بسم الله الرحمن الرحیم

به‌نام یکتا مهندس هستی...

مؤسسه انتشارات سری عمران قلم داور

مکانیک خاک

سرشناسه : امیرافشاری، ساسان، ۱۳۵۴-
عنوان و نام پدیدآور : مکانیک خاک (آزمون کارشناسی ارشد)، ساسان امیرافشاری.
مشخصات نشر : تهران : سیمای دانش، ۱۳۹۶
مشخصات ظاهری : ۵۰۰ ص.؛ ۲۲× ۲۹ س.م.
شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۱۲۰-۲۰۲-۵
وضعیت فهرست‌نویسی : فیپای مختصر
یادداشت : فهرست‌نویسی کامل این اثر در نشانی : http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
شناسه افزوده :فراهانی، حسین
شماره کتابشناسی ملی : ۳۸۰۷۴۳۸

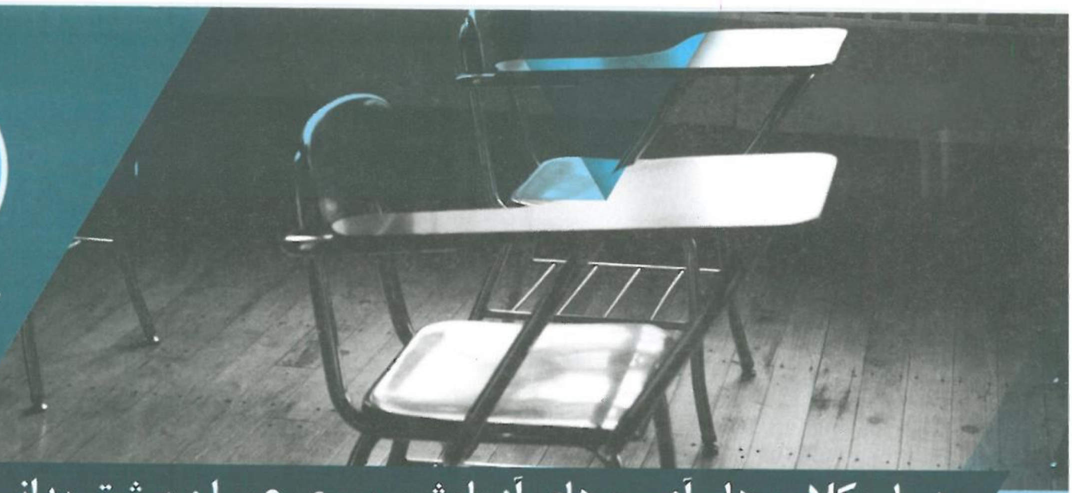
ناشر : انتشارات سیمای دانش
ناشر همکار : مؤسسه انتشارات سری عمران قلم داور
عنوان کتاب : مکانیک خاک (آزمون کارشناسی ارشد)
مؤلف : ساسان امیرافشاری
همکار مؤلف : حسین فراهانی
ناظر علمی : محمد آهنگر
صفحه‌آرا و واژه‌نگار : طاهره نجفی
طراح جلد : منصور سمواتی
لیتوگرافی، چاپخانه و صحافی : امین گراف، خجسته و ساعی
نوبت چاپ : هشتم **سال چاپ** : ۱۳۹۶
شمارگان : ۳۰۰۰ نسخه
قیمت: ۶۵۰۰۰ تومان

نشانی دفتر مرکزی مؤسسه انتشارات سری عمران
تهران، میدان هفت تیر، جنب مسجد الجواد، کوچه بهار مستیان، پلاک ۵۲، واحد ۹
تلفن: ۸۸۳۱۲۵۲۷ - ۸۸۳۰۰۴۷۴ | ارسال کتاب با پیک: ۰۹۱۹-۳۵۷۸۴۲۴
نشانی مرکز پخش : تهران، خیابان انقلاب، ابتدای ۱۲فروردین، پلاک ۳۱۸ / سیمای دانش
تلفن: ۶۶۹۶۶۱۱۴-۱۵

تذکر: به موجب ماده ۵ قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان مصوب ۱۳۴۸/۱۰/۱۱ کلیه حقوق این کتاب برای مؤسسه انتشارات سری عمران محفوظ می‌باشد و هیچ شخص حقیقی یا حقوقی حق چاپ و برداشت تمام یا قسمتی از اثر را به‌صورت چاپ، فتوکپی، جزوه و حتی دست‌نویس ندارد و متخلفین به موجب این قانون تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

Serie Omran

سری عمران



درباره کلاس‌ها و آزمون‌های آزمایشی سری عمران بیشتر بدانیم

مؤسسه سری عمران از آغاز شکل‌گیری تاکنون (حدود یک دهه) با انجام فعالیت‌های آموزشی مختلف و ارائه خدمات متنوع در زمینهٔ آزمون کارشناسی ارشد، آزمون نظام مهندسی و آموزش نرم‌افزارهای مهندسی عمران، به عنوان برترین مؤسسهٔ تخصصی عمران در سال‌های اخیر مطرح شده است. نشر کتاب‌های با کیفیت که منطبق بر علم روز دنیا می‌باشد، برگزاری کلاس توسط برترین اساتید کشور در فضای دانشگاه و نیز برگزاری کنکورهای آزمایشی استاندارد با بیشترین جامعهٔ آماری، همگی سبب شده است تا اعتماد مهندسین عزیز به مؤسسهٔ سری عمران بیشتر شده و هر روز تعداد بیشتری از شما عزیزان به خانوادهٔ بزرگ سری عمران اضافه شوید. عناوین ناشر نمونهٔ سال ۹۱، ناشر تخصصی تقدیر شده در سال ۹۲، ناشر و برند منتخب سال ۹۳، برترین مؤسسه تخصصی در سال ۹۴ و برترین برند آموزشی عمرانی کشور در سال ۹۵ نتیجهٔ اعتماد شما مهندسان عزیز به مؤسسه سری عمران می‌باشد.

امسال نیز (سال تحصیلی ۹۶-۹۷) همگام با سایر فعالیت‌های مؤسسه، برگزاری کلاس‌های آمادگی کنکور کارشناسی ارشد در سه دورهٔ تابستان، پاییز و زمستان در دستور کار موسسه قرار دارد و علاوه بر آن با توجه به تجربه موفق آزمون‌های آزمایشی در سال‌های گذشته، برگزاری کنکورهای آزمایشی مرحله‌ای و جامع جهت آمادگی هر چه بیشتر داوطلبین، مورد نظر مؤسسه می‌باشد. هدف مؤسسه سری عمران از برگزاری کلاس‌های آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و برگزاری کنکورهای آزمایشی، ارتقاء سطح علمی دانشجویان و مهندسان و سپس موفقیت این عزیزان در آزمون کارشناسی ارشد است. برخی از ویژگی‌های این خدمات آموزشی که توسط سری عمران ارائه می‌شود به شرح زیر است:

الف) کلاس‌های آمادگی آزمون کارشناسی ارشد

- حضور برترین اساتید کشور
- تدریس کامل و جامع کلیه مطالب درسی، ارائه نکات کنکوری و راه حل‌های سریع جهت پاسخگویی به سؤالات کنکور، حل تست‌های متنوع تألیفی و بررسی سؤالات آزمون‌های کارشناسی ارشد سال‌های گذشته
- برگزاری آزمون‌های کلاسی منظم جهت حفظ آمادگی دانشجویان
- کلاس‌های حل تمرین حین دوره و یا پس از آن
- جلسات مشاوره و برنامه‌ریزی درسی توسط گروه مشاوران سری عمران

ب) کنکورهای آزمایشی آزمون کارشناسی ارشد

- طرح سؤالات استاندارد و منطبق بر مطالب و سرفصل‌های کنکورهای سراسری هفت سال اخیر که طراحی آنها توسط برترین اساتید کشور صورت می‌گیرد.
- شباهت فراوان سؤالات با سؤالات مطرح شده در کنکورهای سراسری و پیش‌بینی سؤالات احتمالی کنکور
- بالاترین جامعهٔ آماری در کل کشور (بیش از ۴۰۰۰ نفر)
- ارائه خدمات جانبی پس از آزمون مثل مجلهٔ مشاوره‌ای، مصاحبه با رتبه‌های برتر و ...
- حضور دانشجویان دانشگاه‌های برتر کشور در این آزمون‌ها

جهت کسب اطلاعات بیشتر لطفاً با شماره تلفن‌های مؤسسه سری عمران ۸۸۳۰۰۴۷۴ - ۸۸۳۱۲۵۲۷ تماس حاصل نموده و یا به سایت www.serieomran.com مراجعه نمائید.

فهرست

فصل اول: پیدایش خاک‌ها و روابط وزنی و حجمی آنها

قسمت اول: نحوه پیدایش خاک‌ها و کانی‌های تشکیل دهنده آنها ۸
قسمت دوم: روابط وزنی و حجمی در خاک‌ها ۱۵
قسمت سوم: آشنایی با شیوه حل مسائل وزنی و حجمی ۲۵
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۳۵
تست‌های فصل اول ۴۰

فصل دوم: شناخت و نام‌گذاری خاک‌ها

قسمت اول: دانه‌بندی خاک‌ها ۵۲
قسمت دوم: آشنایی با حدود اتربرگ ۶۵
قسمت سوم: نام‌گذاری خاک‌ها ۷۴
قسمت چهارم: مباحث تکمیلی شناخت و نام‌گذاری خاک‌ها ۸۱
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۸۶
تست‌های فصل دوم ۹۰

فصل سوم: تراکم خاک

قسمت اول: مفهوم تراکم، آزمایش تراکم و تفسیر نتایج آن ۱۰۲
قسمت دوم: مفهوم درصد تراکم و حل مسائل اجرایی تراکم ۱۰۹
قسمت سوم: مباحث تکمیلی تراکم خاک ۱۱۳
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۱۱۷
تست‌های فصل سوم ۱۲۰

فصل چهارم: حرکت آب در خاک

قسمت اول: آشنایی با مفهوم انرژی آب در خاک ۱۲۶
قسمت دوم: مفهوم گرادیان هیدرولیکی و محاسبه سرعت حرکت آب در خاک ۱۳۲
قسمت سوم: تراوش یک بعدی آب در خاک های لایه‌بندی شده ۱۳۸
قسمت چهارم: حرکت دو بعدی آب در خاک و بررسی شبکه جریان ۱۴۸
قسمت پنجم: مباحث تکمیلی حرکت آب در خاک ۱۵۸
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۱۶۵
تست‌های فصل چهارم ۱۷۱

فصل پنجم: تنش مؤثر

قسمت اول: مفهوم تنش کل و تنش مؤثر ۱۹۰
قسمت دوم: بررسی حالت‌های خاص در محاسبه تنش مؤثر ۱۹۶
قسمت سوم: کاربرد اصل تنش مؤثر در محاسبه تنش مؤثر خاک‌های دارای تراوش ۲۰۶
قسمت چهارم: فشار تراوش و کاربرد آن در محاسبه تنش مؤثر خاک‌های دارای تراوش ۲۱۱
قسمت پنجم: پایداری خاک‌ها در برابر جوشش و بالازدگی ۲۱۷

فهرست

افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۲۲۶
تست‌های فصل پنجم ۲۲۹

فصل ششم: توزیع تنش در خاک
قسمت اول: روش تقریبی ۲ به ۶ .... ۱۲۴
قسمت دوم: روش بوسینسک و روش وسترگارد ۲۵۲
قسمت سوم: روش منحنی نیومارک ۲۶۵
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۲۶۷
تست‌های فصل ششم ۲۷۰

فصل هفتم: نشست خاک
قسمت اول: آشنایی با مفاهیم تحکیم و تورم در خاک رس ۲۸۰
قسمت دوم: آشنایی با آزمایش تحکیم یک بعدی و نکات مربوط به آن ۲۸۸
قسمت سوم: محاسبه نشست نهایی تحکیم اولیه ۲۹۲
قسمت چهارم: آشنایی با مفهوم درجه تحکیم ۳۰۴
قسمت پنجم: محاسبه نشست در حین تحکیم و آشنایی با پارامترهای سرعت تحکیم ۳۱۲
قسمت ششم: مباحث تکمیلی نشست خاک ۳۱۷
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۳۲۵
تست‌های فصل هفتم ۳۳۷

فصل هشتم: مقاومت برشی خاک
پیش فصل: دایره مور ۳۶۶
قسمت اول: مفاهیم پایه مقاومت برشی ۳۶۸
قسمت دوم: تحلیل روابط گسیختگی المان خاک ۳۷۷
قسمت سوم: نقش آب در مقاومت برشی خاک ۳۸۵
قسمت چهارم: مرور کلی بر آزمایش‌های مقاومت برشی خاک ۳۹۱
قسمت پنجم: انواع آزمایش‌های سه محوری و کاربرد آنها ۳۹۷
قسمت ششم: آشنایی با مفاهیم پس‌فشار، پارامترهای اسکمپتون و مسیر تنش ۴۱۲
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۴۲۳
تست‌های فصل هشتم ۴۳۳

فصل نهم: پایداری شیروانی‌های خاکی
قسمت اول: بررسی پایداری شیروانی‌های خاکی نامحدود ۴۵۴
قسمت دوم: بررسی پایداری شیروانی‌های خاکی محدود ۴۶۴
قسمت سوم: مباحث تکمیلی پایداری شیروانی‌های خاکی ۴۷۱
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۴۷۳
تست‌های فصل نهم ۴۷۷
آزمون‌های سراسری و دکتری از سال ۹۴ به بعد ۴۸۴

سخـــن مـــؤلف

مکانیک خاک یکی از دروس پایه و مهم در مهندسی عمران است که شاید آموزش و یادگیری آن در ابتدا مشکل به نظر برسد. ساختار آزمایشگاهی این درس، مفاهیم مشترک با درس مکانیک سیالات و از همه مهمتر فرمول‌های فراوان، همگی از مشکلات و دغدغه‌هایی است که می‌تواند دانشجویان را نسبت به مکانیک خاک کم علاقه کند. اما واقعیت این است که مکانیک خاک درس نسبتاً ساده‌ای است، به شرطی که آموزش آن به‌صورت صحیح و با یک دیدگاه مفهومی انجام شود.

پس از تألیف کتاب مکانیک خاک در سال ۷۹ و بازنویسی آن در سال ۸۹، اکنون و با توجه به نیازهای امروز دانشجویان و مهندسین گرامی، تصمیم به تألیف کتاب **نسل جدید مکانیک خاک** گرفتم که کاملاً متفاوت با دو کتاب قبلی است. در همین راستا و در جهت پر بارتر شدن کتاب و آماده شدن هر چه سریعتر آن، دوستان عزیزم آقایان دکتر محمد آهنگر و مهندس حسین فراهانی نیز با کمک‌های بی‌دریغ و ایده‌های تأثیرگذار خود مرا یاری کردند تا کتاب حاضر که پیش روی شما عزیزان قرار دارد، ظرف مدت کمتر از یکسال آماده شده و به چاپ برسد.

این کتاب که حاصل سال‌ها تجربه اینجانب در تدریس مکانیک خاک و نیز تجربیات خود و همکارانم در زمینهٔ تألیف کتاب‌های متعدد می‌باشد، به جرأت جزء بهترین کتاب‌های آموزشی مکانیک خاک در دنیاست. از ویژگی‌های این کتاب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- متن درس که شامل مفاهیم اصلی و نکات عمیق مکانیک خاک است، با روشی آسان و زبانی ساده بیان شده است تا با شیوهٔ آموزشی منحصر به فرد خود، تداعی‌کنندهٔ یک کلاسِ درس جذاب باشد.

۲- نکات و مطالب مبهم و پیچیده در مکانیک خاک، با جزئیات و به شیوه‌ای دقیق شرح داده شده‌اند تا دانشجویان عزیز در پایان مطالعهٔ این کتاب به‌طور کامل بر این درس مسلط شوند.

۳- در پایان درسنامهٔ هر فصل، تمریناتی با عنوان «افزایش مهارت و تسلط بیشتر» قرار گرفته است تا دانشجویان علاقمند، با حل و بررسی این مسائل نسبتاً دشوار، به بالاترین سطح آمادگی در این درس برسند.

۴- تمرینات متن درس و تست‌های آخر فصل، ترکیبی از سؤالات آزمون‌های سراسری و مسائل تألیفی هستند و در انتخاب و ترتیب آنها، نهایت دقت صورت گرفته است تا با روند آموزشی کتاب هماهنگ باشند و به مهارت دانشجویان گرامی در این درس، به‌تدریج اضافه کنند.

در نگارش این کتاب تلاش زیادی صورت گرفته است تا کتاب با کمترین ایراد در اختیار شما عزیزان قرار گیرد، ولی به هر حال وجود نقایص احتمالی دور از ذهن نمی‌باشد. از این‌رو از استادان گرانقدر و دانشجویان فهیم تقاضا می‌شود تا با مراجعه به سایت سری عمران، قبول زحمت کرده و ما را در رفع مشکلات کتاب یاری دهند.

در خاتمه از دوستان عزیزم جناب آقای دکتر آهنگر و جناب آقای مهندس فراهانی تشکر می‌کنم که مرا در نگارش این کتاب یاری دادند. همچنین از جناب آقای دکتر شریفیان مدیریت مؤسسه سری عمران و نیز سرکار خانم طاهره نجفی که واژه‌نگاری، صفحه‌آرایی و طراحی کلیه شکل‌های کتاب به عهده ایشان بود نهایت سپاس را دارم. امید است تلاش مجموعهٔ سری عمران در ارائه این کتاب مورد قبول دانشجویان و مهندسین گرامی واقع شود.

موفق و پیروز باشید

ساسان امیرافشاری

فصل ۱: پیدایش خاک‌ها و روابط وزنی و حجمی آنها

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

همهٔ ما از دوران کودکی با خاک آشنا هستیم و از همان ابتدا به خاک کنار دریا، شن و ماسه و همچنین به خاک سرخ رنگ سفالگری، رس می‌گفتیم.

اما جالب است بدانید که از نگاه یک مهندس عمران، آنچه در مورد خاک حائز اهمیت است، رفتار خاک است زیرا در نهایت سازه روی خاک ساخته می‌شود و خاک باید بتواند نیروهای ناشی از آن را تحمل کند. بررسی دقیق‌تر این موضوع در مهندسی عمران مربوط به شاخهٔ ژئوتکنیک یا همان مکانیک خاک است. مکانیک خاک در واقع علمی است که در ابتدای آن، خواص فیزیکی خاک بررسی می‌شود و در ادامه به رفتار مکانیکی خاک تحت بارهای وارد بر آن پرداخته می‌شود.

در این فصل ابتدا نگاهی گذرا بر نحوهٔ پیدایش خاک‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ آنها داریم و در ادامه با پارامترهای وزنی و حجمی در خاک آشنا می‌شویم. بر این اساس قسمت‌های مختلف این فصل به شکل نمودار درختی زیر خواهد بود:

پیدایش خاک‌ها و روابط وزنی و حجمی آنها
- قسمت اول: نحوهٔ پیدایش خاک‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ آنها
- قسمت دوم: روابط وزنی و حجمی در خاک‌ها
- قسمت سوم: آشنایی با شیوهٔ حل مسائل وزنی و حجمی

A-۱- نحوهٔ پیدایش خاک‌ها

به‌طور کلی اصلی‌ترین بخش تشکیل‌دهندهٔ لایهٔ سطحی زمین، خاک و سنگ می‌باشند که منشاء پیدایش هر دوی آنها یکی است. در عمل می‌توان گفت در طبیعت، خاک از تخریب سنگ به‌وجود می‌آید که این تخریب، می‌تواند به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی باشد.

در ادامه با بررسی چند سؤال، بحث فوق را بهتر درک خواهیم کرد:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: با توجه به آنچه از دورهٔ دبیرستان به خاطر دارید، چه تفاوتی بین فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی وجود دارد؟

پاسخ: در یک فرآیند فیزیکی مثل آب شدن یخ، ماهیت مادهٔ اولیه عوض نمی‌شود. این در حالی است که در یک فرآیند شیمیایی مثل سوختن یک تکه چوب، ماهیت مادهٔ اولیه تغییر می‌کند.

سؤال ۲: خاک حاصل از تخریب فیزیکی سنگ‌ها (مواردی مانند برخورد سنگ‌ها به هم، سقوط سنگ از یک ارتفاع و ...) چه نام دارد و ویژگی آن چیست؟

پاسخ: این خاک‌ها که معمولاً درشت‌دانه هستند، خاک‌های دانه‌ای نام دارند و ویژگی مهم آنها این است که ماهیت یکسانی با سنگ مادر (سنگ اصلی تشکیل‌دهنده‌شان) دارند.

سؤال ۳: خاک حاصل از تخریب شیمیایی سنگ‌ها (مواردی مانند هوازدگی، تبادل یونی در محیط‌های خورنده و ...) چه نام دارد و ویژگی آن چیست؟

پاسخ: این خاک‌ها که معمولاً ریزدانه هستند، رس نامیده می‌شوند و ویژگی مهم آنها این است که ماهیت آنها با سنگ مادر متفاوت می‌باشد.

نتیجه: خاک‌های دانه‌ای از تخریب فیزیکی و خاک‌های رسی از تخریب شیمیایی سنگ‌ها به‌وجود می‌آیند. این موضوع نشان می‌دهد که خاک‌های دانه‌ای قابلیت تخریب شیمیاییِ بیشتر را دارند، در حالی‌که خاک‌های رسی به اندازهٔ‌کافی دچار تخریب شیمیایی شده‌اند و احتمال تخریب شیمیاییِ بیشتر در آنها کم است.

تمرین ۱: درمورد چگونگی شکل‌گیری و نحوهٔ پیدایش انواع خاکها، کدام عبارت صحیح می‌باشد؟

(سراسری - ۸۳)

۱) خاکهای دانه‌ای از تخریب شیمیایی سنگ‌ها به‌وجود آمده‌اند.

۲) خاکهای ریزدانه رسی از تخریب مکانیکی سنگ‌های دگرگونی به‌وجود آمده‌اند.

۳) رس‌ها از روند تخریب فیزیکی خاک به‌وجود می‌آیند و شکل دانه‌های آن صفحه‌ای است.

۴) رس‌ها از روند تخریب شیمیایی خاک به‌وجود می‌آیند و ممکن است ترکیبات شیمیایی متفاوتی داشته باشند.

حل: با توجه به مطالب گفته شده، گزینهٔ (۴) جواب درست است.

A-۲- طبقه‌بندی انواع خاک‌ها

خاک‌ها براساس اندازهٔ دانه‌ها و نیز رفتارشان در برابر رطوبت، به دو صورت به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

الف) طبقه‌بندی براساس اندازهٔ دانه‌های خاک: در این طبقه‌بندی، خاک‌ها به دو دستهٔ درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم می‌شوند که درشت‌دانه‌ها شامل شن و ماسه و ریزدانه‌ها نیز شامل لای (سیلت) و رس می‌باشند. دقت شود که شن‌ها درشت‌تر از ماسه‌ها هستند و همچنین ابعاد لای‌ها از رس‌ها بزرگ‌تر است.

قسمت اول (نحوهٔ پیدایش خاک‌ها و کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ آنها)

زیر شاخه‌های قسمت اول

A-۱- نحوهٔ پیدایش خاک‌ها
A-۲- طبقه‌بندی انواع خاک‌ها
A-۳- انواع کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ خاک‌ها
A-۴- تحلیل رفتار خاک‌ها در برابر رطوبت
A-۵- ساختمان خاک
A-۶- آشنایی با پارامترهای مقاومتی در خاک

ب) طبقه‌بندی براساس رفتار خاک در برابر رطوبت: در این طبقه‌بندی، خاک‌ها در دو دستهٔ دانه‌ای و چسبنده قرار می‌گیرند که رس به‌عنوان خاک چسبنده و شن، ماسه و لای (سیلت) به‌عنوان خاک‌های دانه‌ای شناخته می‌شوند.

- طبقه‌بندی (الف)
  - درشت‌دانه
    - شن (درشت‌تر)
    - ماسه (ریزتر)
  - ریزدانه
    - لای (بزرگتر)
    - رس (کوچکتر)

- طبقه‌بندی (ب)
  - دانه‌ای
    - شن
    - ماسه
    - لای
  - چسبنده: رس

تمرین ۲: آیا ذرات بسیار ریز گرد سنگ (پودر سنگ) که دارای اندازه‌ای کوچکتر از ۲ میکرون هستند (یعنی ابعادی نزدیک به ابعاد ذرهٔ رس دارند)، جزء خاکهای رسی به‌شمار می‌روند؟

- حل: خیر، پودر سنگ از تخریب فیزیکی سنگ در حین برش به‌وجود آمده است و جزء خاکهای رسی محسوب نمی‌شود. باید توجه داشت که تمام ذراتی که به اندازهٔ رس هستند، الزاماً رسی نیستند و خواصی مشابه با رس به هنگام مواجهه با رطوبت ندارد. شرط آنکه خاکی جزء خاکهای رسی به شمار آید آن است که دارای **کانی‌های رسی** باشد. اینکه کانی رسی چیست و چه ویژگی دارد، موضوعی است که می‌خواهیم در ادامهٔ بحث به آن بپردازیم.

A-۳- انواع کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ خاک‌ها

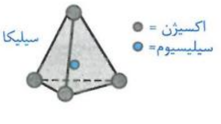
اگر به یک تودهٔ خاک دقیق‌تر نگاه کنید، متوجه می‌شوید که دانه‌های جامد خاک جزء اصلی این توده را تشکیل می‌دهند. دانه‌های جامد خاک نیز خود از یک سری مواد معدنی جامد درست شده‌اند که به آنها **کانی** گفته می‌شود و رفتار خاک به آنها وابسته است. کانی‌ها معمولاً ترکیب شیمیایی مشخصی دارند و به‌صورت بلوری می‌باشند.

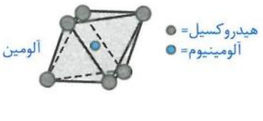
کوارتز، میکا و فلدسپات نمونه‌ای از کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ خاک‌های دانه‌ای می‌باشند و **کائولینیت، ایلیت و مونت موریلونیت** (مونموریونیت) نیز کانی‌هایی هستند که اکثر رس‌ها از آنها تشکیل شده‌اند.

در ادامه با توجه به نقش کانی‌های رسی در جذبِ آب توسط رس (موضوعی که در مورد خاک‌های دانه‌ای اتفاق نمی‌افتد)، بحث در مورد کانی‌ها را فقط به کانی‌های رسی اختصاص داده و از پرداختن به کانیِ خاک‌های دانه‌ای صرف‌نظر می‌کنیم.

کانی‌های رسی

کانی‌های رسی، سیلیکات‌های آلومینیوم با ساختار پیچیده می‌باشند که از واحدهای بنیادیِ چهار وجهی سیلیکا (sio_2) و هشت وجهی آلومین (AL_2O_3) تشکیل یافته‌اند.





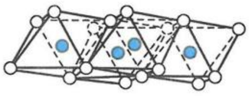
نحوهٔ شکل‌گیری کانی‌های رسی به این ترتیب است که:

- ابتدا واحدهای بنیادی به هم می‌پیوندند و مطابق شکل‌های زیر، واحدهای ساختمانی (صفحه‌ای) را بوجود می‌آورند.

الف) به هم پیوستن سیلیکاها و تشکیل صفحهٔ ذوزنقه‌ای یا صفحهٔ سیلیکا (S)

صفحهٔ ذوزنقه‌ای

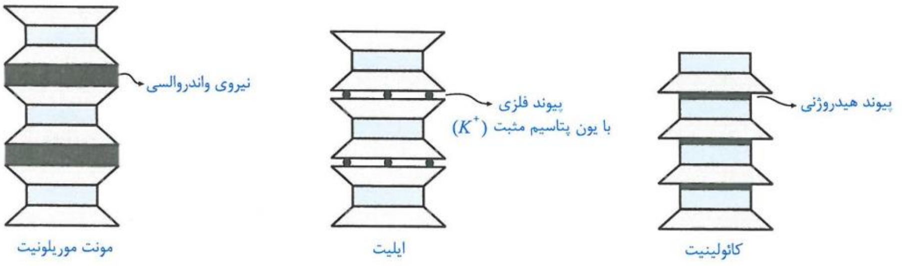
ب) به هم پیوستن آلومین‌ها و تشکیل صفحهٔ مستطیلی یا صفحهٔ گیبسیت (G)



صفحهٔ مستطیلی

ج) به هم پیوستن آلومین‌ها و سیلیکاها و تشکیل صفحات ترکیبی SGS و SG

● سپس از به هم پیوستن واحدهای ساختمانی، کانی‌های رسیِ کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت به‌صورت زیر بوجود می‌آیند.



در مورد کانی‌های رسی به نکات زیر که کمی به شیمی مرتبط هستند، توجه کنید:

۱) مطالعات نشان می‌دهد که پیوند هیدروژنی در کائولینیت‌ها از پیوند فلزی (با یون پتاسیم) در ایلیت‌ها قوی‌تر است و نیروی واندروالسی در مونت موریلونیت‌ها نیز از هر دو پیوند هیدروژنی و فلزی ضعیف‌تر می‌باشد. با توجه به این موضوع می‌توان گفت که پیوند کائولینیت‌ها از ایلیت‌ها قوی‌تر بوده و پیوند ایلیت‌ها نیز از مونت موریولونیت‌ها قوی‌تر است.

از نظر قدرت پیوند شیمیایی : کائولینیت > ایلیت > مونت موریلونیت

۲) با توجه به قدرت پیوندها در کانی‌های رسی می‌توان گفت که پایدرای ترکیب شیمیایی در کائولینیت‌ها از بقیه بیشتر بوده و در مونت موریلونیت‌ها از بقیه کمتر است. این موضوع نشان می‌دهد که تمایل به انجام واکنش و فعالیت در کائولینیت‌ها از بقیه کمتر و در مونت موریلونیت‌ها از بقیه بیشتر است.

از نظر پایداری کانی رسی : کائولینیت > ایلیت > مونت موریلونیت
از نظر تمایل به انجام واکنش : کائولینیت < ایلیت < مونت موریلونیت

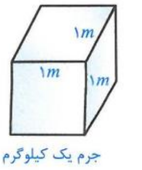
۳) ترتیب ابعاد کانی‌های رسی نیز مانند پیوند آنهاست به این شکل که ابعاد کائولینیت‌ها از ایلیت‌ها بزرگتر است و ابعاد ایلیت‌ها نیز از مونت موریلونیت‌ها بزرگتر می‌باشد.

از نظر ابعاد کانی‌ها : کائولینیت > ایلیت > مونت موریلونیت

در ادامه می‌خواهیم شما را با یک مفهوم مهم به نام سطح ویژه (سطح مخصوص) آشنا کنیم و سپس آن را در کانی‌های رسی مختلف با هم مقایسه کنیم.

سطح ویژه

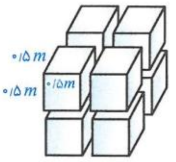
برای شروع بحث، یک مکعب به ضلع $1m$ و جرم $1kg$ را مطابق شکل زیر در نظر گرفته و نسبت مساحت جانبی به جرم این مکعب را به‌دست می‌آوریم:



(تعداد وجوه مکعب = ۶)

$$\frac{\text{مساحت جانبی}}{\text{جرم}} = \frac{(1\times 1)\times 6}{1} = 6\ m^2/kg$$

حال اگر این مکعب را به قطعات کوچکتری تقسیم کنیم، مثلاً طول هر ضلع آن را نصف کنیم، در آن‌صورت نسبت فوق برابر می‌شود با:



(تعداد وجوه مکعب = ۶ ، تعداد مکعب‌ها = ۸)

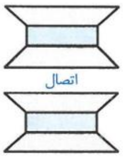
$$\frac{\text{مساحت جانبی}}{\text{جرم}} = \frac{(0/5\times 0/5)\times 6 \times 8}{1} = 12\ m^2/kg$$

به‌طور کلی نسبت مساحت جانبی یک جسم به جرم آن را **سطح ویژه** یا **سطح مخصوص** می‌نامند و همانطورکه ملاحظه می‌کنید، هر چقدر جسم ریزتر می‌شود و ابعادِ قطعات تشکیل‌دهندهٔ آن کوچکتر می‌شوند، سطح ویژهٔ آن بزرگتر می‌گردد. حال اگر بخواهیم سطح ویژهٔ انواع خاک‌ها را با هم مقایسه کنیم، در آن‌صورت برای یک تودهٔ خاک با جرم مشخص می‌توان با توجه به ابعاد خاک‌ها گفت:

رس مونت موریلونیت > رس ایلیت > رس کائولینیت > لای > ماسه > شن

این موضوع نشان می‌دهد که سطح ویژهٔ رس‌ها اساساً از خاک‌های دانه‌ای بزرگتر است.

تمرین ۳: در کانی رسی از انواع ایلیت (*Illite*) اتصال بین صفحات سیلیکا (*Silica*) و آلومینا (*Alumina*) به چه صورت برقرار می‌شود؟ (سراسری - ۸۷)



۱) با باند هیدروژن مثبت ۲) با یون k مثبت
۳) با باند هیدروکسیل منفی ۴) با مولکول‌های آب

● حل: با توجه به شکل ارائه شده برای کانی‌های رسی، گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴: کدام کانی رسی در طبیعت بیشتر از سایر کانی‌ها یافت می‌شود؟

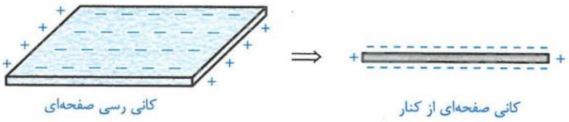
۱) مونت موریلونیت ۲) کائولینیت ۳) هالوزیت ۴) ایلیت

● حل: با توجه به توضیحاتی که دادیم، کائولینیت یک کانی رسی پایدار و غیرفعال است، بنابراین تمایلی به انجام واکنش نداشته و خواستار ترکیب اصلی خود می‌باشد. از این‌رو طبیعی است که بیشتر از سایر کانی‌ها در طبیعت یافت شود و گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح است.

A-۴- تحلیل رفتار خاک‌ها در برابر رطوبت

همانطور که گفتیم خاک رس رفتار چسبنده دارد، یعنی بر خلاف خاک‌های دانه‌ای آب را جذب می‌کند و چسبناک می‌شود. از طرفی می‌دانیم رفتار خاک‌ها در شرایط مختلف و از جمله در حضور آب، دقیقاً بستگی به نوع کانی‌های آنها دارد. در ادامه می‌خواهیم با توجه به مطالبی که از بخش قبلی در مورد کانی‌های رسی یاد گرفتیم، علت جذب آب و چسبناکی رس را پیدا کنیم.

ذرات رس عمدتاً به‌صورت صفحه‌ای می‌باشند، هر چند می‌توان به ندرت ذرات سوزنی شکل را نیز در آنها مشاهده کرد. حال فرض کنید که یک ذرهٔ رسی صفحه‌ای شکل داریم، مطالعات نشان می‌دهد که در این حالت سطح ذرهٔ رس، به‌علت نوع ترکیب شیمیایی رس‌ها دارای بار منفی است و دو گوشهٔ این صفحه بار مثبت دارند:



در ادامه با بررسی چند سؤال، به علت و چگونگی جذب آب توسط رس‌ها پی می‌بریم:

بررسی چند سوال

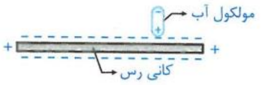
سؤال ۱: چرا سطح ذرات رس دارای بار منفی می‌باشد؟

● پاسخ: این موضوع به نوع ترکیب شیمیایی رس‌ها مربوط می‌شود و علت دقیق آن را باید در علم شیمی جستجو کرد، ولی به‌طور مختصر و صرفاً جهت اطلاع شما باید بگوییم که این بارهای منفی عمدتاً ناشی از جایگزینی اتم‌های آلومینیوم و سیلیسیوم توسط اتم‌هایی با ظرفیت کمتر هستند که به آن **پدیدهٔ جانشینی ایزومرفیک** گفته می‌شود (فکر خودتان را مشغول نکنید، موضوع پر اهمیتی نیست!).

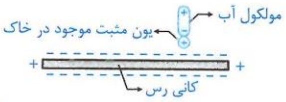
سؤال ۲: وجود بارهای منفی فراوان روی سطح رس، چگونه می‌توانند باعث جذب آب در رس شوند؟

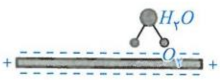
● پاسخ: از آنجائی‌که مولکول آب یک مولکول دو قطبی است، بنابراین می‌تواند از طریق مکانیزم‌های زیر خود را به رس نزدیک کرده و جذب رس شود:

۱) مولکول دو قطبی آب به طور مستقیم از قسمت مثبت خود به سطح رس که دارای بار منفی است، نزدیک شده و جذب می‌شود.



۲) مولکول‌های دو قطبی آب از قسمت منفی خود جذب یون‌های مثبت موجود در خاک شده و سپس با این یون‌های مثبت به سطح رس که دارای بار منفی است، جذب می‌شوند که به این پدیده، **هیدراته شدن کاتیون‌ها** گفته می‌شود.





۳ اتم‌های هیدروژن در مولکول‌های آب، به علت پیوند هیدروژنی، توسط اتم‌های اکسیژن موجود در سطح ذرات رس جذب می‌شوند و به این ترتیب آب جذب رس می‌گردد. توجه کنید که این مکانیزم ربطی به دو قطبی بودن مولکول آب ندارد و نسبت به دو مکانیزم قبلی، کمتر اتفاق می‌افتد.

سؤال ۳: به آب جذب شده توسط ذرات رس چه می‌گویند و چه ویژگی دارد؟

● پاسخ: تمام آب‌هایی که با نیروی جاذبه در تماس با ذرات رس هستند، **آب لایهٔ دوگانه** نامیده می‌شوند که به داخلی‌ترین بخش آب لایهٔ دوگانه، **آب جذب سطحی** می‌گوییم.

اگرچه تمام آب لایهٔ دوگانه با جاذبهٔ قوی در تماس با ذرات رس است، ولی بخش مربوط به آب جذب سطحی است که با لزجت بالا، مثل یک چسب لزج عمل کرده و ذرات رس را به هم می‌چسباند و باعث می‌شود تا خاک رس به‌صورت یک تودهٔ خمیری درآید.

سؤال ۴: منظور از آب آزاد (در شکل بالا) در خاک رس چیست و چه ویژگی دارد؟

● پاسخ: آب آزاد همان آب موجود در حفرات خاک است که جاذبه‌ای با ذرات رس ندارد و با لزجت پایین، به راحتی در حفرات خاک رس جابه‌جا می‌شود. آب آزاد اگر مقدارش در خاک زیاد شود، می‌تواند باعث روان شدن خاک گردد، یعنی باعث شود تا خاک مثل یک مایع رفتار کند.

سؤال ۵: در بخش قبل دیدیم که سطح ویژهٔ رس‌ها از خاک‌های دانه‌ای بزرگتر است. به نظر شما بزرگ بودن سطح ویژه در رس‌ها چه نقشی در جذب آب توسط آنها دارد؟

● پاسخ: بزرگ بودن سطح ویژه باعث می‌شود تا در یک جرم مشخص از خاک رس، سطح جانبی خاک بزرگتر بوده و در نتیجه بارهای منفی بیشتری نیز برای جذب آب توسط رس وجود داشته باشند، پس جذب آب در آن بیشتر می‌شود.

از مطالب فوق دو نتیجهٔ مهم می‌توان گرفت:

۱ عامل ایجاد آب جذب سطحی، دو قطبی بودن مولکول‌های آب و بزرگ بودن سطح ویژه در رس‌هاست.

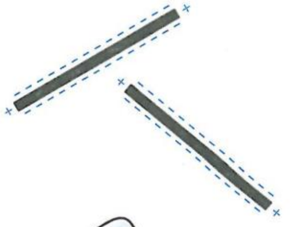
۲ هر چه سطح ویژهٔ کانی رسی بزرگتر باشد، آب بیشتری جذب کرده و بیشتر متورم می‌شود (باد می‌کند). بنابراین می‌توان با توجه به بزرگتر بودن سطح ویژهٔ مونت موریلونیت‌ها نسبت به ایلیت‌ها و نیز ایلیت‌ها نسبت به کائولینیت‌ها، ترتیب بیشتر بودن جذب آب و قابلیت تورم در کانی‌های رسی را به‌صورت زیر بیان کرد:

مونت موریلونیت > ایلیت > کائولینیت

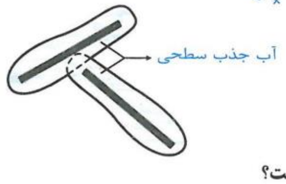
سؤال ۶: به‌نظر شما آیا فقط آب جذبی سطحی باعث چسبناک شدن رس می‌شود یا رس خشک هم چسبندگی دارد؟

● پاسخ: در جواب این سؤال باید بگوییم که ما اصولاً دو نوع چسبندگی داریم که ماهیت آنها با هم متفاوت است:

۱ چسبندگی حالت خشک که توسط **نیروهای جاذبهٔ الکترواستاتیکی** ایجاد می‌شود و باعث اتصال یک کانی به کانی دیگر شده و ربطی به حضور آب ندارد.



۲ چسبندگی حالت تر که در آن آب جذب سطحی همانند یک چسب لزج ذرات رس را به هم می‌چسباند و بر خلاف چسبندگی حالت خشک، باعث می‌شود تا تودهٔ رسی به‌صورت یک خمیر شکل‌پذیر در بیاید.



سؤال ۷: آیا ترتیب بیشتر بودن خاصیت خمیری در کانی‌های رسی مثل ترتیب جذب آب و قابلیت تورم آنهاست؟

● پاسخ: تقریباً بله! یعنی خاصیت خمیری مونت موریلونیت از بقیه بیشتر است ولی خاصیت خمیری ایلیت‌ها و کائولینیت‌ها تقریباً با هم یکسان است.

در ادامه برای مرور این مطالب، به حل سه تست زیر می‌پردازیم.

تمرین ۵: کدام عبارت درمورد خاکهای رس صحیح می‌باشد؟ (سراسری - ۸۴)

الف) صفحه‌ای شکل بودن ذرات رس عامل ایجاد آب جذب سطحی می‌باشد.

ب) آب جذب سطحی که به سطح ذرات می‌چسبد عامل روانی رس‌ها می‌باشد.

ج) دوقطبی بودن مولکول آب، علت به‌وجود آمدن آب جذب سطحی در اطراف ذرات رس می‌باشد.

د) آب آزاد که در فضای خالی بین ذرات رس وجود دارد، عامل رفتار خمیری رس‌ها می‌باشد.

۱) ج   ۲) ب و د   ۳) الف و د   ۴) الف و ب و ج

● حل: همانطورکه دیدید، دو قطبی بودن مولکول آب و بزرگ بودن سطح ویژه (سطح مخصوص) علت به‌وجود آمدن آب جذب سطحی در اطراف رس می‌باشند و همین آب جذب سطحی است که علت رفتار خمیری در رس‌هاست. با توجه به این توضیحات واضح است که فقط عبارت (ج) صحیح بوده و گزینهٔ (۱) پاسخ درست این تست است.

تمرین ۶: کدام‌یک از جملات زیر درمورد خاصیت خمیری خاکهای ریزدانه رسی صحیح است؟ (سراسری - ۸۵)

۱) علت خاصیت خمیری بزرگ بودن سطح مخصوص دانه‌های رس و قطبی بودن مولکول‌های آب است.

۲) علت خاصیت خمیری کوچک بودن سطح مخصوص دانه‌های رس و قطبی بودن مولکول‌های آب است.

۳) علت خاصیت خمیری بزرگ بودن سطح مخصوص دانه‌های رس و تمرکز یون‌های مثبت در سطح کانی‌هاست.

۴) علت خاصیت خمیری کوچک بودن سطح مخصوص دانه‌های رس و تمرکز یون‌های مثبت در سطح کانی‌هاست.

● حل: با توجه به توضیحات تست قبل، واضح است که گزینه (۱) پاسخ درست این تست است.

بزرگ بودن سطح ویژه + قطبی بودن مولکول آب ⇐ ایجاد آب جذب سطحی ⇐ ایجاد خاصیت خمیری

تمرین ۷: کدام‌یک از گزینه‌های زیر در مورد چسبندگی خاک رس صحیح می‌باشد؟

۱) چسبندگی رس خشک در اثر نیروهای جاذبه و دافعه الکترواستاتیکی بین کانی‌های رسی به‌وجود می‌آیند.

۲) چسبندگی در رس مرطوب ناشی از آب جذب سطحی بوده و باعث رفتار خمیری در رس می‌شود.

۳) چسبندگی در رس خشک ناشی از نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی است و در صورت مرطوب شدن رس، عامل ایجاد رفتار خمیری رس است.

۴) چسبندگی در رسِ مرطوب ناشی از نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی بین کانی‌های رسی است.

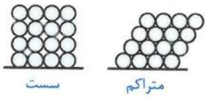
● حل: با توجه به توضیحات متن درس و دو تست قبلی، گزینه (۲) پاسخ درست این تست است.

A-۵- ساختمان خاک

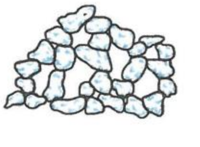
به‌ترتیب قرار گرفتن ذرات خاک در کنار هم و تأثیر آن بر روی نیروهای بین ذرات، **ساختمان** خاک یا **ساختار** خاک گفته می‌شود. ساختمان خاک در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده متفاوت بوده و به‌صورت زیر می‌باشد:

خاک‌های دانه‌ای:

- ساختمان تک‌دانه‌ای

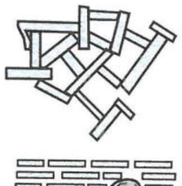


- ساختمان لانه زنبوری



خاک‌های چسبنده:

- ساختمان مجتمع یا فولکوله (نامنظم)



- ساختمان پراکنده یا لایه‌ای (منظم)

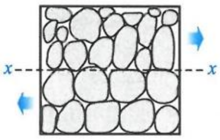
در مورد ساختمان خاک‌ها به دو نکتهٔ زیر توجه کنید:

۱) بارگذاری استاتیکی قابل توجه و یا تجربه رطوبت‌های زیاد (بیش از حد اشباع) سبب می‌شوند تا ساختمان لانه زنبوری در خاک‌های دانه‌ای به ساختمان تک‌دانه‌ای تبدیل شود. در خاکهای چسبنده نیز همین عوامل باعث تبدیل ساختمان مجتمع به پراکنده هستند.

۲) ساختمان مجتمع در خاکهای چسبنده زمانی اتفاق می‌افتد که برآیند نیروهای الکتریکی بین ذرات، جاذبه باشد (سر مثبت به بدنه منفی وصل شود). در طرف مقابل هنگامی که برآیند نیروهای مذکور دافعه است، ساختمان خاکِ چسبنده، به‌صورت پراکنده خواهد بود.

A-۶- آشنایی با پارامترهای مقاومتی در خاک

منظور از مقاومت خاک، مقاومت برشی آن است که البته به‌طور مفصل در فصل هشتم این کتاب در مورد آن صحبت خواهیم کرد، ولی در اینجا به‌طور مختصر شما را با پارامترهای مقاومتی خاک آشنا می‌کنیم.



برای شروع، شکل مقابل را در نظر بگیرید که در آن یک تودهٔ خاک، در امتداد فرضی $x-x$ به دو قسمت تقسیم شده است. فرض کنید شرایط به‌گونه‌ای است که قسمت بالا می‌خواهد به سمت راست و قسمت پایین بخواهد به سمت چپ حرکت کرده و در نهایت این موضوع باعث گسیختگی خاک شود.

در ادامه با بررسی چند سؤال از شکل فوق به بررسی پارامترهای مقاومتی خاک‌ها خواهیم پرداخت:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: به‌نظر شما چه چیزی در خاک وجود دارد که می‌تواند جلوی این حرکت‌ها را بگیرد؟

● پاسخ: برای این منظور دو عامل وجود دارد؛ این دو عامل اصطکاک بین ذرات خاک و نیز چسبندگی احتمالی بین ذرات می‌باشند که می‌توانند مانع از حرکت و گسیختگی خاک شوند.

سؤال ۲: عوامل مقاومتی فوق چه نام دارند و ما در مکانیک خاک آنها را با چه نمادی نشان می‌دهیم؟

● پاسخ: این عوامل پارامترهای مقاومت برشی خاک نام دارند و به‌صورت زیر نام‌گذاری و نشان داده می‌شوند:

۱- عامل اصطکاک $\Leftarrow$ $\phi =$ زاویه اصطکاک داخلی خاک

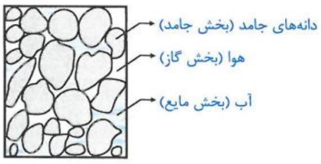
۲- عامل چسبندگی $\Leftarrow$ $c =$ چسبندگی خاک که ناشی از وجود رس می‌باشد.

سؤال ۳: نقش پارامترهای ϕ و c در خاک‌های دانه‌ای و رس‌ها چگونه است؟

● پاسخ: در خاک‌های دانه‌ای چسبندگی صفر بوده و عامل مقاومتِ خاک، صرفاً اصطکاک است. این در حالی است که در رس‌ها سه رفتار زیر وجود دارد:

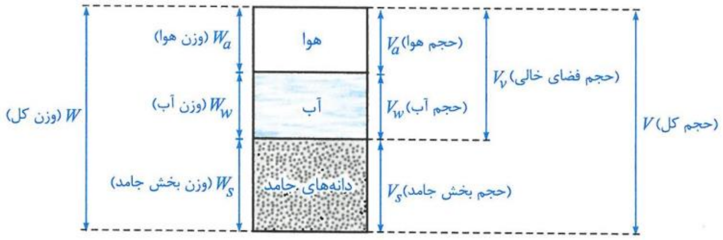
۱- رس اصطکاکی که فاقد چسبندگی است، ۲- رس چسبنده که هر دو عامل اصطکاک و چسبندگی را دارد و ۳- رس صرفاً چسبنده که فاقد اصطکاک است.

B-۱- آشنایی با دیاگرام سه فازی



تـودهٔ خـاک شـکل مقابـل را در نظـر بگیریـد. همانطورکه ملاحظه می‌کنید، این توده در حالـت کلـی از سـه بخـش دانـه‌هـای جامـد، آب و هـوا تشکیل می‌شود.

در مکانیک خاک برای نمایش این سه بخش در تودهٔ خـاک، از **دیـاگرام سـه فـازی** اسـتفاده می‌شود. ما با کمک این دیاگرام که یک دیاگرام فرضی است، می‌تـوانیم ویژگـی‌هـای خـاک را راحت‌تر تخمین بزنیم. شکل زیر دیاگرام سه فازی در یک تودهٔ خاک را نشان می‌دهد:



در ادامه می‌خواهیم با بررسی چند سؤال ساده در مورد دیاگرام سه فازی، با این دیاگرام بیـشتر آشنا شویم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: با توجه به دیاگرام سه فازی، وزن کل خاک، حجم فضای خالی خاک (حجم حفرات موجـود در خاک) و حجم کل خاک از چه قسمت‌هایی تشکیل می‌شوند؟

پاسخ: با توجه به شکل ترسیم شده برای دیاگرام سه فازی، می‌توان گفت:

وزن آب + وزن دانه‌های جامد = وزن کل خاک $\Rightarrow$ $W = W_s + W_w$

حجم هوا + حجم آب = حجم فضای خالی $\Rightarrow$ $V_v = V_w + V_a$

حجم هوا + حجم آب + حجم دانه‌های جامد = حجم کل خاک

$\Rightarrow$ $V = V_s + V_w + V_a = V_s + V_v$

تذکر: همانطور که در شکل دیاگرام سه فازی نیز مشخص شده است، وزن هوای موجود در تودهٔ خاک صفر است.*

سؤال ۲: در مورد وزن و حجم یک خاک خشک چه اظهارنظری می‌توان کرد؟

پاسخ: در یک خاک خشک هیچگونه آبی وجود ندارد و تمام حجم فضای خالی آن را هـوا پر کرده است، بنابراین می‌توان گفت:

$$W = W_s + W_w \xrightarrow{W_w = 0} W = W_s$$

$$V_v = V_w + V_a \xrightarrow{V_w = 0} V_v = V_a \Rightarrow V = V_s + V_v = V_s + V_a$$

* به علت قانون ارشمیدس وزن هوا در هوا (مثل وزن آب در آب) دقیقاً برابر صفر است.

زیر شاخه‌های قسمت دوم
B-۱- آشنایی با دیاگرام سه فازی
B-۲- معرفی انواع وزن مخصوص‌ها در خاک
B-۳- آشنایی با پارامترهای وزنی و حجمی پایه
B-۴- مطالب تکمیلی روابط وزنی و حجمی

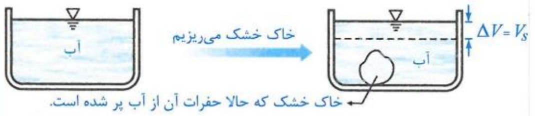
سؤال ۳: در مورد یک خاک اشباع (یعنی خاکی که تمام حجم فضای خالی آن را آب پر کرده است)، چه اظهار نظری می‌توان کرد؟

● پاسخ: در چنین خاکی حجم فضای خالی با حجم آب برابر بوده و حجم هوا صفر است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$V_v = V_w + V_a \xrightarrow{V_a = 0} V_v = V_w \Rightarrow V = V_s + V_v = V_s + V_w$$

سؤال ۴: در آزمایشگاه برای به‌دست آوردن W_s و V_s در مقدار مشخصی از یک خاک، چگونه عمل می‌کنیم؟

● پاسخ: برای به‌دست آوردن W_s کافی است تا خاک را در کوره (گرمخانه یا اُوِن) خشک کرده و سپس وزن آن را اندازه بگیریم. آنچه به‌دست می‌آید، W_s است که علاوه بر وزن دانه‌های جامد، وزن حالت خشک خاک هم می‌باشد. برای تعیین V_s خاک نیز بایستی خاک خشک شده در کوره را در یک ظرف آب مدرج بریزیم و سپس افزایش حجم درون ظرف را مشخص کنیم. آنچه به‌دست می‌آید، V_s است که همان حجم دانه‌های جامد خاک می‌باشد.



B-۲- معرفی انواع وزن مخصوص‌ها در خاک

همانطورکه می‌دانید وزن مخصوص یک ماده از حاصل تقسیم وزن بر حجم آن به‌دست می‌آید. در مکانیک خاک پنج نوع وزن مخصوص به‌صورت زیر برای یک خاک قابل تعریف است:

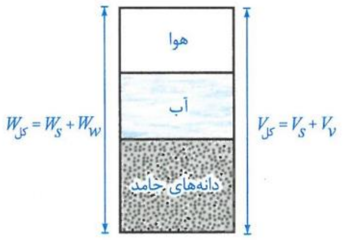
۱ وزن مخصوص طبیعی (γ_t) ۲ وزن مخصوص خشک (γ_d) ۳ وزن مخصوص اشباع (γ_{sat})

۴ وزن مخصوص غوطه‌وری (γ') ۵ وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک (γ_s)

در ادامهٔ بحث، به بررسی این وزن مخصوص‌ها می‌پردازیم.

۱- وزن مخصوص طبیعی خاک

اگر وزن خاک به هنگام نمونه‌گیری از طبیعت (وزن طبیعی خاک) را به حجم تودهٔ خاک تقسیم کنیم، در آن‌صورت وزن مخصوص طبیعی خاک به‌دست می‌آید که آن را با γ_t یا γ نشان می‌دهند.



$$\text{وزن مخصوص طبیعی خاک} = \frac{\text{وزن کل خاک}}{\text{حجم تودهٔ خاک}} \Rightarrow \gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v}$$

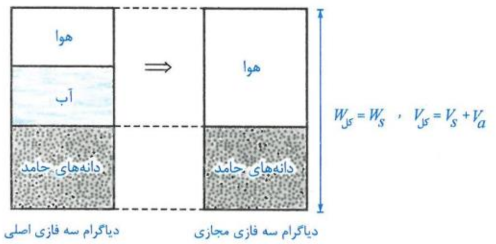
تذکر: واحدهای متداول برای وزن مخصوص عبارتند از kgf/m^3، grf/cm^3، $tonf/m^3$، N/m^3 و kN/m^3 که نحوهٔ تبدیل آنها به هم به شکل مقابل است:

$$1\,grf/cm^3 = 1\,tonf/m^3 \xrightarrow{\times 1000} kgf/m^3 \xrightarrow[\simeq \times 10]{\times 9/81} N/m^3 \xrightarrow{\times 0/001} kN/m^3$$

توجه کنید که در مکانیک خاک معمولاً حرف f را از واحدهای kgf/m^3، grf/cm^3 و $tonf/m^3$ حذف می‌کنند و آنها را مثل واحد جرم مخصوص و به فرم kg/m^3، gr/cm^3 و ton/m^3 نمایش می‌دهند.

۲- وزن مخصوص خشک خاک

برای به‌دست آوردن وزن مخصوص خشک خاک که آن را با γ_d نشان می‌دهیم، ابتدا بایستی به‌صورت مجازی فرض کنیم که خاک خشک است و در فضای خالی آن فقط هوا وجود دارد. سپس از حاصل تقسیم وزن این حالت خشکِ فرضی به حجم تودهٔ خاک، وزن مخصوص خشک خاک را به‌دست می‌آوریم.



دیاگرام سه فازی اصلی — دیاگرام سه فازی مجازی

$$\text{وزن مخصوص خشک خاک} = \frac{\text{وزن خشک خاک}}{\text{حجم تودهٔ خاک}}$$

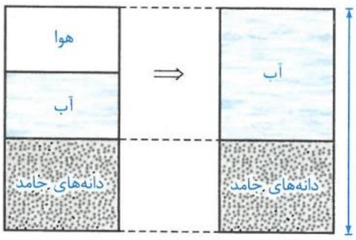
$$\Rightarrow \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_s + V_a}$$

تذکر ۱: وزن مخصوص خشک خاک به علت آنکه با دانه‌های جامد یعنی جزء اصلی و مقاوم خاک مرتبط است، مبنای بسیاری از قضاوت‌های مهندسی در علم مکانیک خاک است.

تذکر ۲: برخی از دانشجویان به اشتباه تصور می‌کنند که γ_d تنها برای خاک‌های خشک قابل تعریف است، این در حالی است که این نوع وزن مخصوص برای هر سه نوع خاکِ خشک، اشباع و نیمه اشباع (فضای خالی شامل آب و هواست) تعریف شده و قابل تعیین است.

۳- وزن مخصوص اشباع خاک

برای به‌دست آوردن وزن مخصوص اشباع خاک که آن را با γ_{sat} نشان می‌دهیم، ابتدا بایستی به‌صورت مجازی فرض کنیم که خاک اشباع است و آب تمام فضای خالی آن را پر کرده است. سپس از حاصل تقسیم وزن این حالت اشباعِ فرضی به حجم تودهٔ خاک، وزن مخصوص اشباع را به‌دست آوریم.



$W_{کل} = W_S + W_{W_{اشباع}}$ ، $V_{کل} = V_S + V_W$

دیاگرام سه فازی اصلی　　دیاگرام سه فازی مجازی

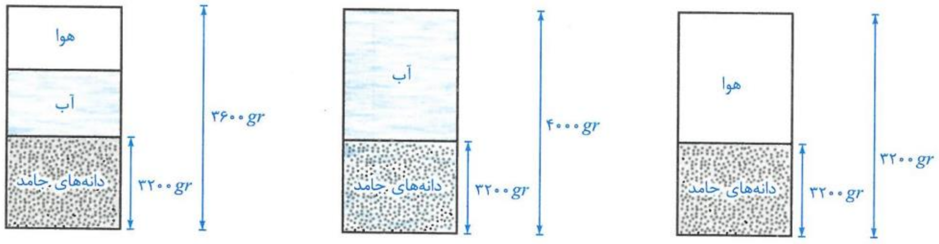
$$\text{وزن مخصوص اشباع خاک} = \frac{\text{وزن اشباع خاک}}{\text{حجم تودهٔ خاک}}$$

$$\Rightarrow \quad \gamma_{sat} = \frac{W_{اشباع}}{V} = \frac{W_s + (W_w)_{اشباع}}{V_s + V_w}$$

تذکر: γ_{sat} نیز مثل γ_d در هر سه نوع خاک خشک، اشباع و نیمه اشباع قابل تعریف است.

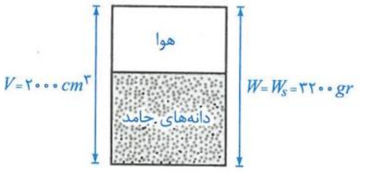
برای درک بهتر وزن مخصوص‌هایی که تا اینجا یاد گرفتیم، به دو تمرینی که در ادامه مطرح می‌کنیم، توجه کنید.

تمرین ۸: در شکل زیر دیاگرام سه فازی برای یک خاک در سه وضعیت مختلف نشان داده شده است. مقادیر وزن مخصوص خشک، اشباع و طبیعی را در این سه وضعیت به‌دست آورید. (حجم خاک در هر سه حالت یکسان بوده و برابر $2000\ cm^3$ است.)



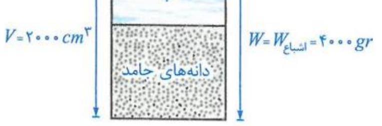
حالت (۱)　　حالت (۲)　　حالت (۳)

● حل: برای محاسبهٔ وزن مخصوص خشک خاک در هر حالت کافی است فرض کنیم که خاک خشک بوده و هیچگونه آبی در فضای خالی آن وجود ندارد. با این فرض دیاگرام سه فازی مجازی در هر سه حالت یکسان بوده و مطابق شکل زیر است:



$$\xrightarrow{\text{محاسبهٔ } \gamma_d} \gamma_{d_1} = \gamma_{d_2} = \gamma_{d_3} = \frac{W_s}{V} = \frac{3200}{2000} = 1/6\ gr/cm^3$$

به شیوهٔ مشابه می‌توان گفت دیاگرام سه فازی مجازی هر سه حالت برای محاسبهٔ γ_{sat} یکسان بوده و به شکل زیر است:



$$\xrightarrow{\text{محاسبهٔ } \gamma_{sat}} \gamma_{sat_1} = \gamma_{sat_2} = \gamma_{sat_3} = \frac{W_{اشباع}}{V} = \frac{4000}{2000} = 2\ gr/cm^3$$

در مورد وزن مخصوص طبیعی خاک نیز کافی است، وزن کل خاک در هر حالت را به حجم تودهٔ خاک تقسیم کنیم:

$$\begin{cases} \gamma_{t_1} = \dfrac{W_1}{V} = \dfrac{3600}{2000} = 1/8\ gr/cm^3 \\ \gamma_{t_2} = \dfrac{W_2}{V} = \dfrac{W_{\text{اشباع}}}{V} = \dfrac{4000}{2000} = 2\ gr/cm^3 \\ \gamma_{t_3} = \dfrac{W_3}{V} = \dfrac{W_s}{V} = \dfrac{3200}{2000} = 1/6\ gr/cm^3 \end{cases} \Rightarrow \gamma_{t_2} > \gamma_{t_1} > \gamma_{t_3}$$

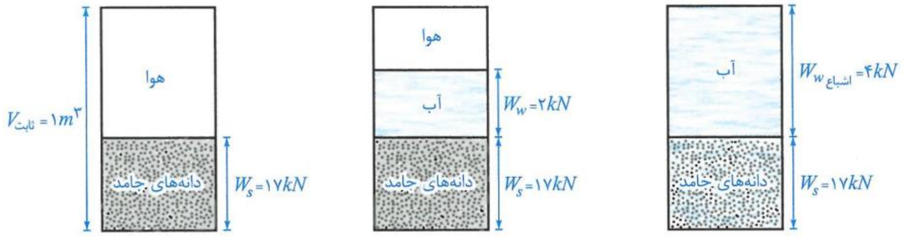
نتیجه: مقدار γ_d و γ_{sat} در یک خاک با حجم ثابت، به میزان آب موجود در خاک بستگی ندارد و تنها به پارامترهای V_s، V_v و W_s وابسته است.

تمرین ۹: در یک خاک مرطوب با وزن مخصوص $\gamma_t = 19\ kN/m^3$، وزن مخصوص‌های خشک و اشباع به‌ترتیب برابر $\gamma_d = 17\ kN/m^3$ و $\gamma_{sat} = 21\ kN/m^3$ می‌باشند. در یک متر مکعب از این خاک در حالت‌های خشک، اشباع و طبیعی (وضعیت موجود) مقدار وزن دانه‌های جامد و آب چقدر است؟

● **حل:** وزن مخصوص در واقع وزن واحد حجم خاک ($1\ m^3$ یا $1\ cm^3$) است. در این سؤال چون حجم خاک برابر $1\ m^3$ داده شده است، بنابراین اعداد داده شده برای وزن مخصوص‌ها در واقع وزن خاک در حالت‌های طبیعی، خشک و اشباع را مشخص می‌کنند.

$$\begin{cases} \gamma_d = 17\ kN/m^3 \xrightarrow{V = 1 m^3} W_s = 17\ kN \quad , \quad W_w = 0 \\ \gamma_t = 19\ kN/m^3 \xrightarrow{V = 1 m^3} W = W_s + W_w = 19\ kN \quad , \quad W_s = 17\ kN \Rightarrow W_w = 2\ kN \\ \gamma_{sat} = 21\ kN/m^3 \xrightarrow{V = 1 m^3} W_{\text{اشباع}} = W_s + W_{w_{\text{اشباع}}} = 21\ kN \quad , \quad W_s = 17\ kN \Rightarrow W_{w_{\text{اشباع}}} = 4\ kN \end{cases}$$

شکل‌های زیر دیاگرام سه فازی این سه حالت از خاک را نشان می‌دهند که در آنها وزن دانه‌های جامد و آب در هر حالت مشخص است:



حالت خشک ($W_{\text{کل}} = W_s = 17kN$) — حالت طبیعی ($W_{\text{کل}} = W_s + W_w = 19kN$) — حالت اشباع ($W_{\text{کل}} = W_s + W_{w_{\text{اشباع}}} = 21kN$)

۴- وزن مخصوص غوطه‌وری خاک

اگر خاک اشباع باشد می‌توانیم از حاصل تقسیم وزن غوطه‌ور خاک بر حجم تودهٔ خاک، وزن مخصوص غوطه‌وری خاک را تعیین کنیم. منظور از وزن غوطه‌ور خاک آن است که نیروی شناوری* را از وزن تودهٔ خاک در حالت اشباع کم کنیم. با توجه به این موضوع وزن مخصوص غوطه‌وری که آن را با γ' نشان می‌دهیم برابر است با:

$$\gamma' = \frac{W'}{V} = \frac{W - F_B}{V} = \frac{\gamma_{sat} V - \gamma_w V}{V} = \gamma_{sat} - \gamma_w \Rightarrow \boxed{\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w}$$

تذکر ۱: برای خاک‌های خشک و نیمه اشباع، وزن مخصوص غوطه‌وری تعریف نمی‌شود و γ' فقط مخصوص خاک‌های اشباع است.

تذکر ۲: γ' نیز مانند γ_{sat} به مقدار رطوبت خاک بستگی ندارد.

تذکر ۳: در بین وزن مخصوص‌هایی که برای تودهٔ خاک تعریف می‌شوند، γ' کمترین و γ_{sat} بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهند.

تذکر ۴: γ' در محاسبات تنش مؤثر که در فصل پنجم کتاب می‌خوانید، کاربرد زیادی دارد.

---

* نیروی شناوری یا نیروی ارشمیدس (F_B) برای جسمی که به‌طور کامل در داخل یک سیال مانند آب قرار گرفته است، از حاصل‌ضرب حجم این جسم در وزن مخصوص آب به‌دست می‌آید.

۵- وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک

این وزن مخصوص مربوط به دانه‌های جامد است و برای کل تودهٔ خاک تعریف نمی‌شود، بنابراین مقدار آن از تقسیم کردن وزن قسمت جامد بر حجم قسمت جامد به‌دست می‌آید:

$$\text{وزن مخصوص دانه‌های جامد} = \frac{\text{وزن دانه‌های جامد}}{\text{حجم دانه‌های جامد}} \Rightarrow \gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

تذکر۱: با اضافه و کم کردن آب به خاک و یا کوبیدن خاک، پارامترهای W_s و V_s تغییر نکرده و γ_s ثابت است.

تذکر۲: اگر وزن مخصوص یک ماده را به وزن مخصوص آب تقسیم کنیم، **چگالی نسبی** آن ماده به‌دست می‌آید که کمیتی بدون واحد است. حال اگر وزن مخصوص دانه‌های جامد را به وزن مخصوص آب تقسیم کنیم، چگالی نسبی دانه‌های جامد به‌دست می‌آید که آن را با G_s نمایش می‌دهیم. G_s را علاوه بر این، **تودهٔ ویژه خاک** و حتی به اختصار، **چگالی دانه‌های جامد** نیز می‌نامند و برابر است با:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s\,\gamma_w}$$

تذکر۳: مقدار γ_w بر حسب واحدهای مختلف به شرح زیر است:

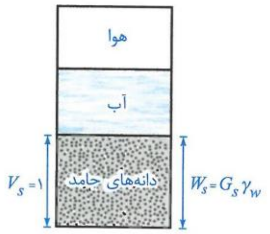
$$\gamma_w = ۱\,gr/cm^۳ = ۱\,t/m^۳ = ۱۰۰۰\,kg/m^۳ = ۹۸۱۰\,N/m^۳ \xrightarrow{g=۱۰\,m/s^۲} \gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$$

تذکر۴: محدودهٔ تعیین شده برای انواع وزن مخصوص‌ها در خاک‌ها را می‌توان براساس یافته‌های تجربی، به‌صورت زیر بیان کرد:

وزن مخصوص ($kN/m^۳$)	حداقل	حداکثر
γ_s	۲۲	۲۸
γ_{sat}	۱۷	۲۲
γ_t	۱۶	۱۹
γ_d	۱۴	۱۹
γ'	۷	۱۲

$$\Rightarrow ۲/۲ < G_s < ۲/۸$$

تذکر۵: اگر در یک خاک حجم دانه‌های جامد را برابر واحد در نظر بگیریم ($V_s = ۱$)، در آن‌صورت وزن دانه‌های جامد خاک (W_s) برابر است با:



$$G_s = \frac{W_s}{V_s\,\gamma_w} \xrightarrow{V_s=۱} W_s = G_s\,\gamma_w$$

در ادامه با حل دو تمرین دیگر، بحث وزن مخصوص‌ها را کامل می‌کنیم.

تمرین ۱۰: یک متر مکعب از خاکی با وزن مخصوص اشباع $۲۰\,kN/m^۳$، در اثر تبخیر ۲۰ درصد آب خود را از دست می‌دهد ولی حجم آن تغییر نمی‌کند. انواع وزن مخصوص‌های این خاک چگونه تغییر می‌کنند؟

● **حل:** همانطورکه گفتیم γ_d، γ_{sat}، γ' و γ_s به میزان آب موجود در خاک بستگی ندارند و ثابت می‌باشند. این در حالی است که γ_t با کاهش آب، از مقدارش کاسته می‌شود و برابر مقدار زیر خواهد بود:

$$\gamma_{t_۲} = \frac{W_s + W_{w_۲}}{V} = \frac{W_s + ۰/۸\,W_{w_۱}}{V} = \frac{W_s + W_{w_۱} - ۰/۲\,W_{w_۱}}{V} = \underbrace{\frac{W_s + W_{w_۱}}{V}}_{\gamma_{t_۱}} - \underbrace{۰/۲\left(\frac{W_{w_۱}}{V}\right)}_{\text{میزان کاهش } \gamma_t}$$

تمرین ۱۱: یک نمونه خاک مرطوب به حجم $۱۰۰ cm^۳$ و وزن $۲۰۰ gr$، پس از خشک شدن در کوره ۲۰ درصد از وزنش کاسته می‌شود. اگر وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک برابر $۲/۵ gr/cm^۳$ باشد، در آن‌صورت حجم حفرات خاک چند $cm^۳$ خواهد بود؟

ابتدا وزن دانه‌های جامد خاک (W_s) را که معادل با وزن خاک پس از خشک شدن است، می‌یابیم:

$$W_۲ = ۰/۸ W_۱ \Rightarrow W_s = ۰/۸ W_۱ = ۰/۸ \times ۲۰۰ = ۱۶۰ gr \quad (W_۲ = W_s)$$

در ادامه با استفاده از رابطهٔ γ_s، مقدار V_s را تعیین می‌کنیم:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \Rightarrow ۲/۵ = \frac{۱۶۰}{V_s} \Rightarrow V_s = ۶۴ cm^۳$$

و در نهایت V_v به‌صورت مقابل به‌دست می‌آید:

$$V = V_s + V_v \Rightarrow ۱۰۰ = ۶۴ + V_v \Rightarrow V_v = ۳۶ cm^۳$$

B-۳- آشنایی با پارامترهای وزنی و حجمی پایه

در این بخش می‌خواهیم با پارامترهای وزنی و حجمی پایه در یک خاک آشنا شویم. این پارامترها در حالت کلی به سه دستهٔ زیر تقسیم می‌شوند:

۱) پارامتر مربوط به دانه‌های جامد خاک

۲) پارامترهای مربوط به فضای خالی خاک

۳) پارامترهای مربوط به حضور آب در فضای خالی خاک

۱- پارامتر مربوط به دانه‌های جامد خاک

دانه‌های جامد خاک به‌عنوان جزء اصلی خاک مطرح می‌باشند و پارامتر مرتبط با آنها، همان چگالی نسبی دانه‌های جامد یا تودهٔ ویژهٔ خاک است که در بخش قبلی رابطه آن را به‌صورت زیر مشخص کردیم:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$$

همانطورکه قبلاً نیز گفته شد، محدودهٔ تغییرات G_s بین ۲/۲ و ۲/۸ است که البته در خاک‌های آلی از ۲ هم می‌تواند کمتر باشد.

۲- پارامترهای مربوط به فضای خالی خاک

فضای خالی خاک به عنوان جزء فرعی خاک مطرح می‌باشد و پارامترهای مرتبط با آن عبارتند از نسبت تخلخل (e)، تخلخل (n) و میزان یا درصد هوا (A) که در ادامه شما را با آنها آشنا می‌کنیم.

الف) نسبت تخلخل یا نشانهٔ خلاء (e)

اگر خاک را به دو قسمت دانه‌های جامد و فضای خالی تقسیم کنیم، در آن‌صورت نسبت حجم فضای خالی (V_v) به حجم باقی‌ماندهٔ خاک، یعنی حجم دانه‌های جامد (V_s) را **نسبت تخلخل یا نشانهٔ خلاء** می‌گوییم:

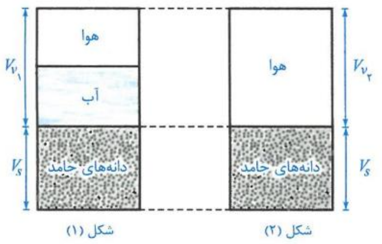
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

در مورد پارامتر e می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) از لحاظ ریاضی، مقدار e در بازهٔ صفر تا بی‌نهایت قرار می‌گیرد ولی در عمل مقدار e بین ۰/۲۵ و ۳ است.

$$۰/۲۵ \le e \le ۳$$

(۰/۲۵: مخلوط شن و ماسه و لای متراکم — ۳: رس نرم آبی رنگ)

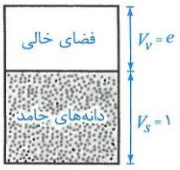


شکل (۱) — شکل (۲)

۲) پارامتر e به حجم حفرات خاک مرتبط است و ربطی به میزان آب در این حفرات ندارد. با توجه به این موضوع، e در دو دیاگرام سه فازی مقابل یکسان است:

$$V_{s\,\text{ثابت}}, \quad V_{v_۱} = V_{v_۲} \Rightarrow e_۱ = e_۲$$

۳ اگر در یک خاک حجم دانه‌های جامد را برابر واحد در نظر بگیرید ($V_s = ۱$)، حجم فضای خالی خاک (V_v) برابر است با:



$$e = \frac{V_v}{V_s} \xrightarrow{V_s = ۱} V_v = e$$

ب) تخلخل یا پوکی (n)

اگر حجم فضای خالی خاک را به حجم کل آن تقسیم کنید، پارامتری به نام **تخلخل** یا **پوکی** به‌دست می‌آید:

$$n = \frac{V_v}{V}$$

در مورد پارامتر n می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱ از لحاظ ریاضی، مقدار n در بازه صفر تا یک قرار دارد ولی در عمل مقدار آن بین ۰/۲ و ۰/۷۵ است.

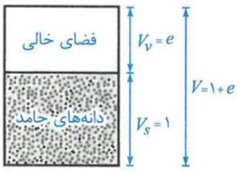
متراکم‌ترین حالت ← ۰/۲

$$۰/۲ \le n \le ۰/۷۵$$

شل‌ترین حالت ← ۰/۷۵

۲ پارامتر n نیز مانند e بستگی به حجم فضای خالی خاک دارد و میزان آب موجود در فضای خالی خاک در مقدار آن تأثیرگذار نیست.

۳ می‌دانیم اگر حجم قسمت جامد خاک را برابر واحد در نظر بگیریم ($V_s = ۱$)، در آن‌صورت حجم فضای خالی برابر e می‌شود. حال اگر تعریف تخلخل (n) را بنویسیم، عملاً ارتباط بین e و n به‌دست می‌آید*:



$$n = \frac{V_v}{V} \Rightarrow n = \frac{e}{۱ + e}$$

ج) درصد هوا (A)

درصد هوا در یک خاک از تقسیم حجم هوا بر حجم کل خاک به‌دست می‌آید:

$$A = \frac{V_a}{V}$$

توجه کنید که وقتی خاک اشباع باشد، $V_a = ۰$ بوده و A کمترین مقدار خود را داشته و برابر صفر است. این در حالی است که وقتی خاک خشک باشد، A بیشترین مقدار خود را دارد و برابر است با:

$$A = \frac{V_a}{V} = \frac{V_v}{V} = n$$

۳- پارامترهای مربوط به حضور آب در فضای خالی خاک

پس از آنکه دانه‌های جامد خاک را به‌عنوان جزء اصلی و فضای خالی آن را به‌عنوان جزء فرعی خاک معرفی کردیم، حالا نوبت آن است که حضور آب در فضای خالی را با تعریف پارامتر حجمی درجه اشباع (S_r) و پارامتر وزنی میزان رطوبت (ω)، بررسی نماییم.

الف) درجهٔ اشباع خاک (S_r)

از تقسیم حجم آب بر حجم فضای خالی خاک، **درجهٔ اشباع** به‌دست می‌آید و در صورتی‌که بر حسب درصد نوشته شود (در عدد ۱۰۰ ضرب شود)، به آن **درصد اشباع خاک** می‌گوییم.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

---

* رابطهٔ به‌دست آمده، کلی بوده و برای هر مقداری از حجم V_s (نه لزوماً $V_s = ۱$) نیز برقرار است. برای کنترل صحت این موضوع کافی است تا در مخرج رابطهٔ n به‌جای V از $V_v + V_s$ استفاده کرده و سپس با تقسیم صورت و مخرج بر V_s، رابطهٔ فوق را در حالت کلی به‌دست آورید.

در مورد پارامتر S_r می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) بسته به وضعیت رطوبتی خاک، سه حالت زیر برای درجه اشباع اتفاق می‌افتد:

$$\begin{cases} \text{خاک خشک } (V_w = 0) \Rightarrow S_r = 0 \\ \text{خاک اشباع } (V_w = V_v) \Rightarrow S_r = 1 \text{ یا } 100\% \\ \text{خاک نیمه اشباع یا به اصطلاح مرطوب } (V_w < V_v) \Rightarrow 0 < S_r < 1 \end{cases}$$

۲) درجهٔ اشباع هیچگاه بزرگتر از یک (٪۱۰۰) نمی‌شود حتی اگر بعد از اشباع شدن خاک، باز هم به آن آب اضافه نماییم. (چرا؟)

ب) میزان رطوبت خاک (ω)

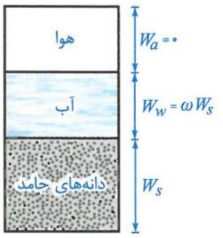
از تقسیم وزن آب موجود در خاک به وزن دانه‌های جامد، **میزان رطوبت** خاک به‌دست می‌آید که اگر برحسب درصد نوشته شود (در عدد ۱۰۰ ضرب شود)، به آن **درصد رطوبت خاک** می‌گویند.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

در مورد پارامتر ω می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) اگرچه درصد اشباع حداکثر برابر ٪۱۰۰ است ولی میزان رطوبت خاک بسته به نوع خاک می‌تواند از ٪۱۰۰ هم بیشتر باشد (مثلاً در رس مونت موریلونیت).

۲) به عنوان یک نکتهٔ بسیار مهم که در حل مسائل این فصل کاربرد زیادی دارد، باید بدانیم که اگر وزن قسمت جامد را برابر W_s در نظر بگیریم، در آن‌صورت وزن آب برابر ωW_s بوده و وزن کل خاک برابر است با:



$$W_{\text{کل}} = W_s + W_w = W_s + \omega W_s \Rightarrow W_{\text{کل}} = W_s(1+\omega)$$

به عنوان اولین نتیجهٔ کاربردی از رابطهٔ فوق، می‌توان گفت اگر در یک سؤال وزن کل و میزان رطوبت خاک را به ما بدهند، به‌سادگی می‌توانیم وزن قسمت‌های مختلف تودهٔ خاک را به‌دست آوریم:

$$W_{\text{کل}} = W_s(1+\omega) \Rightarrow W_s = \frac{W_{\text{کل}}}{1+\omega}$$

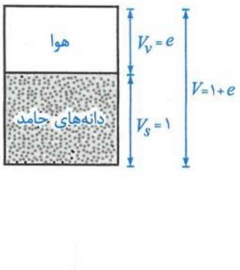
$$W_w = W_{\text{کل}} - W_s = W_{\text{کل}}\left(1 - \frac{1}{1+\omega}\right) = W_{\text{کل}}\left(\frac{\omega}{1+\omega}\right)$$

B-۴- مطالب تکمیلی روابط وزنی و حجمی

در بررسی مطالب بخش‌های قبلی، با موضوع جالبی آشنا شدیم و دیدیم که اگر $V_s = 1$ فرض شود، نتایج به‌دست آمده از این فرض، در تحلیل ذهنی روابط به ما کمک خواهند کرد. مثلاً وقتی $V_s = 1$ در نظر گرفته شود، $W_s = G_s \gamma_w$ و $V_v = e$ خواهد شد و ارتباط بین e و n نیز به‌راحتی به‌دست می‌آید. در حالت کلی می‌توان گفت که در بکارگیری روابط وزنی و حجمی در یک نمونه خاک محدودیتی وجود ندارد و از این‌رو می‌توان حجم یک قسمت دلخواه از خاک را برابر واحد فرض کرده و در صورت امکان، حجم و وزن سایر قسمت‌ها را به‌دست آورد. این روش علاوه بر تحلیل ذهنی مسائل، در اثبات و به‌خاطر سپردن فرمول‌های وزنی و حجمی نیز بسیار مفید است.

برای درک بهتر این روش و کاربردهای آن، به تمرین بعد توجه کنید.

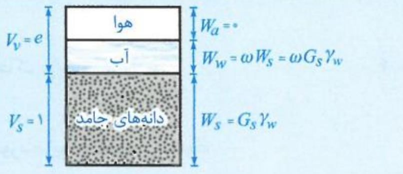
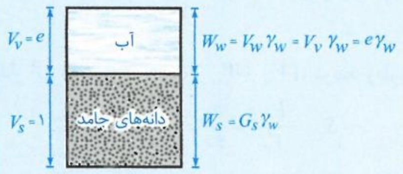
تمرین ۱۲: وزن مخصوص خشک خاک (γ_d) را برحسب پارامترهای G_s و e به‌دست آورید.



حل: برای محاسبهٔ وزن مخصوص خشک خاک، دیاگرام سه فازی مقابل را در نظر می‌گیریم که در آن $V_s = 1$ فرض شده است. در این شرایط $W_s = G_s \gamma_w$ و $V_v = e$ خواهد بود و γ_d برابر است با:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \Rightarrow \gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}$$

به همین طریق می‌توانیم برای محاسبهٔ γ_t، γ_{sat} و γ' نیز روابط مشابهی ارائه کنیم که آن‌ها را در جدول زیر نشان داده‌ایم:

	دیاگرام سه فازی	شیوهٔ محاسبه
وزن مخصوص حالت مرطوب		$\gamma_t=\frac{\text{وزن خاک}}{\text{حجم کل}}=\frac{W_s+W_w}{V}\Rightarrow$ $\gamma_t=\frac{G_s\gamma_w+\omega G_s\gamma_w}{1+e}=\frac{G_s(1+\omega)}{1+e}\gamma_w$
وزن مخصوص حالت اشباع		$\gamma_{sat}=\frac{\text{وزن خاک اشباع}}{\text{حجم کل}}=\frac{W_s+W_w}{V}\Rightarrow$ $\gamma_{sat}=\frac{G_s\gamma_w+e\gamma_w}{1+e}=\frac{(G_s+e)}{1+e}\gamma_w$
وزن مخصوص غوطه‌وری		$\gamma'=\gamma_{sat}-\gamma_w=\frac{(G_s-1)}{1+e}\gamma_w$

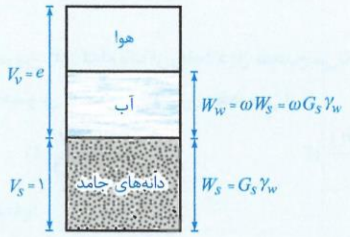
دو رابطه مهم و کاربردی

در اینجا می‌خواهیم شما را با دو رابطه مهم آشنا کنیم که اهمیت زیادی داشته و در حل مسائل کاربرد زیادی دارند.

۱ ارتباط بین پارامترهای G_s، e، ω و S_r به‌صورت زیر است:

$$\omega G_s=S_r e$$

- اثبات از طریق دیاگرام سه فازی:



$$\begin{cases} W_w=\omega G_s\gamma_w \Rightarrow \omega G_s=\frac{W_w}{\gamma_w}=V_w \\ S_r=\frac{V_w}{V_v}\Rightarrow V_w=S_rV_v \\ V_v=e \end{cases} \Rightarrow \omega G_s=S_r e$$

۲ ارتباط بین وزن مخصوص خشک (γ_d) و وزن مخصوص مرطوب (γ_t) در یک خاک به‌صورت زیر است:

$$W_{\text{کل}}=W_s(1+\omega)\xrightarrow{\text{طرفین را بر } V \text{ تقسیم می‌کنیم}}\frac{W_{\text{کل}}}{V}=\frac{W_s}{V}(1+\omega)\Rightarrow \gamma_d=\frac{\gamma_t}{1+\omega}$$

در ادامه به حل چند تمرین از روابط ارائه شده تا این جای بحث می‌پردازیم.

تمرین ۱۳: یک نمونه خاک مرطوب به وزن ۱۸۰ گرم و حجم $100\,cm^3$ پس از خشک شدن در کوره ۳۰ گرم از وزنش کاسته می‌شود. اگر چگالی دانه‌های جامد $G_s=2/5$ باشد، موارد خواسته شدهٔ زیر را تعیین کنید.

الف) نسبت تخلخل، تخلخل و درصد هوای خاک

ب) میزان رطوبت و درجهٔ اشباع خاک

ج) وزن مخصوص‌های مرطوب، خشک و اشباع خاک

- پاسخ

الف) با توجه به اطلاعات صورت سؤال، معلوم است که وزن اولیهٔ نمونه برابر ۱۸۰ گرم می‌باشد و وقتی آن را در کوره خشک می‌کنیم، آب آن که ۳۰ گرم است، تبخیر شده و ۱۵۰ گرمِ باقی‌مانده (۱۵۰ = ۳۰ − ۱۸۰)، همان وزن دانه‌های جامد خواهد بود.

برای شروع، ابتدا با استفاده از اطلاعات قسمت جامد خاک (G_s, W_s)، حجم دانه‌های جامد (V_s) را می‌یابیم:

$$G_s=\frac{W_s}{V_s\gamma_w}\Rightarrow 2/5=\frac{150}{V_s\times 1}\Rightarrow V_s=60\,cm^3$$

و از آنجا V_v برابر می‌شود با:

$$V_v = V - V_s = ۱۰۰ - ۶۰ = ۴۰ cm^۳$$

حال می‌توان نسبت تخلخل خاک (e) را به‌دست آورد:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{۴۰}{۶۰} = \frac{۲}{۳}$$

همچنین طبق تعریف، پوکی (n) خاک برابر می‌شود با:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{۴۰}{۱۰۰} = ۰/۴ \quad \text{یا} \quad n = \frac{e}{1+e} = \frac{(\frac{۲}{۳})}{۱+(\frac{۲}{۳})} = ۰/۴$$

و در نهایت درصد هوا (A) نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{V_a}{V} \ , \ V_a = V_v - V_w = V_v - \frac{W_w}{\gamma_w} = ۴۰ - (\frac{۳۰}{۱}) = ۱۰ cm^۳ \Rightarrow A = \frac{۱۰}{۱۰۰} = ۰/۱ \quad \text{یا} \quad ۱۰\%$$

(۳۰ *)

ب) با داشتن اطلاعات مربوط به مقدار آب موجود در خاک (V_w , W_w)، درصد رطوبت و همچنین درصد اشباع خاک برابر می‌شوند با:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{۳۰}{۱۵۰} = ۰/۲ \quad \text{یا} \quad ۲۰\% \qquad S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{۳۰}{۴۰} = ۰/۷۵ \quad \text{یا} \quad ۷۵\%$$

ج) طبق تعریف گفته شده در مورد وزن مخصوص‌های خواسته شده و با توجه به مقادیر موجود برای وزن و حجم خاک، می‌نویسیم:

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{۱۸۰}{۱۰۰} = ۱/۸\ gr/cm^۳$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{۱۵۰}{۱۰۰} = ۱/۵\ gr/cm^۳ \quad \text{یا} \quad \gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+\omega} = \frac{۱/۸}{۱+۰/۲} = ۱/۵\ gr/cm^۳$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{۲/۵ + \frac{۲}{۳}}{۱+\frac{۲}{۳}} \times ۱ = ۱/۹\ gr/cm^۳$$

تمرین ۱۴: کدام‌یک از روابط ذیل صحیح می‌باشد؟ (S_r درجه اشباع، n پوکی، ω درصد رطوبت، G_s چگالی دانه‌های جامد خاک، γ_d وزن مخصوص خشک، γ_w وزن مخصوص آب) (سراسری - ۸۵)

۱) $S_r = \frac{\omega G_s n}{(1-n)}$ ۲) $S_r = \frac{\omega G_s (1-n)}{n}$ ۳) $\gamma_d = \frac{1-n}{G_s}\gamma_w$ ۴) $\gamma_d = \frac{G_s}{1-n}\gamma_w$

● پاسخ

$$\begin{cases} \omega G_s = S_r e \Rightarrow S_r = \frac{\omega G_s}{e} \\ n = \frac{e}{1+e} \Rightarrow n + ne = e \Rightarrow n = e(1-n) \Rightarrow e = \frac{n}{1-n} \end{cases} \Rightarrow S_r = \frac{\omega G_s}{(\frac{n}{1-n})} = \frac{\omega G_s (1-n)}{n} \Rightarrow$$

گزینهٔ (۲) صحیح است

تمرین ۱۵: کدام‌یک از روابط ارائه شده در گزینه‌ها زیر صحیح <u>نیست</u>؟

۱) $A = n(1-S_r)$ ۲) $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$ ۳) $\gamma_{sat} = \gamma_d + n\gamma_w$ ۴) $\gamma_w G_s e = \gamma_d n$

● پاسخ برای پاسخ به این تست، گزینه ها را تک‌تک بررسی می‌کنیم:

گزینهٔ (۱): $n(1-S_r) = \frac{V_v}{V}(1-\frac{V_w}{V_v}) = \frac{V_v}{V} - \frac{V_w}{V} = \frac{V_a}{V} = A$ ✓

گزینهٔ (۲): $\frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \gamma_d$ ✓

گزینهٔ (۳): $\gamma_d + n\gamma_w = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} + \frac{e}{1+e}\gamma_w = \frac{(G_s+e)\gamma_w}{1+e} = \gamma_{sat}$ ✓

گزینهٔ (۴): $\gamma_w G_s e = \gamma_w \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \times e = \gamma_s \times e = \frac{W_s}{V_s} \times \frac{V_v}{V_s} = \frac{W_s}{V} \times \frac{V_v}{V} \times (\frac{V}{V_s})^۲ = \gamma_d\, n\, (\frac{V}{V_s})^۲$ ✗

($\frac{W_s}{V} \to \gamma_d$، $\frac{V_v}{V} \to n$)

بنابراین گزینهٔ (۴) پاسخ این تست است.

---

* همانطورکه می‌بینید، حجم ۳۰ گرم آب، برابر ۳۰ سانتی‌متر مکعب است. باید بگوییم این موضوع عمومیت دارد یعنی وزن آب برحسب گرم با حجم آن برحسب $cm^۳$، از نظر عددی یکسان است.

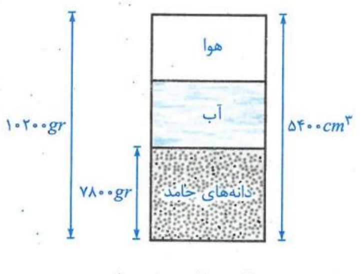
قسمت سوم: آشنایی با شیوه حل مسائل وزنی و حجمی

در قسمت قبل با دیاگرام سه فازی، انواع وزن مخصوص‌ها و پارامترهای وزنی و حجمی در خاک آشنا شدیم و روابط وزنی و حجمی را یاد گرفتیم. شاید در نگاه اول حل مسئله‌های این قسمت ساده به نظر برسد، ولی واقعیت این است که تنوع مسائل روابط وزنی و حجمی بالاست و نیاز است تا با یک طبقه‌بندی مناسب، راه رسیدن به جواب را سریعتر کنیم.
در این قسمت می‌خواهیم حاصل سال‌ها تجربهٔ تدریس خود در کنکور کارشناسی ارشد را در اختیار شما دانشجویان عزیز قرار دهیم و با یک طبقه‌بندی مناسب، روش حل مسائل این فصل را به شما آموزش دهیم.

C-۱- آشنایی با مسائل مقدماتی و ساده

با توجه به روابط وزنی و حجمی خوانده شده، می‌توان اکثر مسئله‌های مربوط به این بحث را در یکی از دو دستهٔ اصلی زیر قرار داد:
دستهٔ اول: مسئله‌هایی که بدون اشاره به وزن مخصوص خاک (طبیعی، خشک و ...)، مقادیر نسبت تخلخل، تخلخل، درجه اشباع و ... را خواسته‌اند. در این حالت باید از روابط وزنی و حجمی پایه‌ای که در بخش ($B-۳$) از قسمت قبل یاد گرفتیم استفاده کرد.
دستهٔ دوم: مسئله‌هایی که در آنها به وزن مخصوص خاک اشاره شده و یا وزن و حجم خاک داده شده است. در اینگونه مسائل ضمن استفاده از روابط وزن مخصوص‌ها (به‌خصوص فرمول‌هایی که ارتباط وزن مخصوص‌ها با پارامترهای G_s، ω و e را نشان می‌دهند)، از روابط وزنی و حجمی پایه و تکمیلی (به‌خصوص رابطهٔ $\omega G_s = S_r e$) نیز استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر، در این مسائل لازم است تا اکثر روابط خوانده شدهٔ این فصل را در ذهن داشته باشید.
در ادامه با حل چند تمرین، با این دسته‌بندی‌ها و روش حل مسائل وزنی و حجمی، بیشتر آشنا خواهید شد.

تمرین ۱۶: مقادیر حجمی و وزنی نمونه‌ای از خاک با $G_s = ۲/۶$ در شکل نشان داده شده است. ضریب تخلخل (e) و درصد اشباع خاک (S_r) به ترتیب چقدر می‌باشند؟ (سراسری - ۹۰)



۱) ۰/۸ و ۱۰۰
۲) ۰/۸ و ۹۰
۳) ۰/۹ و ۹۰
۴) ۰/۹ و ۸۰

● حل: این مسئله از نوع دستهٔ اول است که در آن مقادیر e و S_r خواسته شده است. به همین منظور در ابتدا با استفاده از رابطهٔ مربوط به دانه‌های جامد، مقدار V_s را می‌یابیم:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \xrightarrow{\gamma_w = ۱\, gr/cm^۳} ۲/۶ = \frac{۷۸۰۰}{V_s \times ۱} \Rightarrow V_s = ۳۰۰۰\, cm^۳$$

حال با توجه به دیاگرام سه فازی نشان داده شده و دانستن مقدار V_s، حجم فضای خالی (V_v) را به‌دست می‌آوریم:

$$V_v = V - V_s = ۵۴۰۰ - ۳۰۰۰ = ۲۴۰۰\, cm^۳$$

و در نهایت با فرمول مربوط به e، مقدار آن را محاسبه می‌کنیم:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{۲۴۰۰}{۳۰۰۰} = ۰/۸$$

زیر شاخه‌های قسمت سوم
C-۱- آشنایی با مسائل مقدماتی و ساده
C-۲- بررسی موضوعات خاص در مسائل

برای حل قسمت دوم این تست (یعنی محاسبه S_r) نیز ابتدا حجم آب موجود در خاک را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$W_w = W - W_s = ۱۰۲۰۰ - ۷۸۰۰ = ۲۴۰۰\ gr$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{۲۴۰۰}{۱} = ۲۴۰۰\ cm^۳$$ (ملاحظه می‌کنید که حجم ۲۴۰۰ گرم آب، برابر $۲۴۰۰\ cm^۳$ است.)

سپس با استفاده از فرمول S_r، مقدار آن را به‌دست می‌آوریم:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{۲۴۰۰}{۲۴۰۰} = ۱ = ۱۰۰\%$$

پس گزینه (۱) پاسخ صحیح است.

تذکر: چون در این مسئله، وزن و حجم خاک نیز داده شده است، می‌توانید با کمک روابط وزن مخصوص‌ها و در قالب مسائل دسته دوم نیز این تمرین را حل کنید (به عهدهٔ خودتان).

کمی خلاقیت

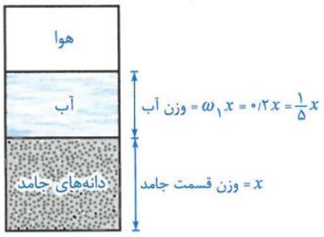
در این سؤال حاصل‌ضرب ω در G_s برابر است با:

$$\omega G_s = \frac{W_w}{W_s} \times G_s = \frac{۱۰۲۰۰ - ۷۸۰۰}{۷۸۰۰} \times ۲/۶ = ۰/۸$$

از طرفی می‌دانیم $\omega G_s = S_r e$ می‌باشد و مقادیر S_r و e نیز در هر گزینه داده شده است. اگر کمی دقت کنید، متوجه می‌شوید که تنها در گزینهٔ (۱) است که حاصل‌ضرب این دو مقدار برابر ۰/۸ است: $S_r \times e = ۱۰۰\%$ یا $۱ \times ۰/۸ = ۰/۸$ $\Rightarrow$ گزینهٔ (۱)

تمرین ۱۷: رطوبت طبیعی مصالح خاکی در یک منبع قرضه برابر ٪۲۰ است. اگر ۶۰۰۰ گرم خاک مرطوب از این قرضه را جهت آزمایش انتخاب کنیم، حجم آب لازم برای اینکه رطوبت آن به ٪۲۵ برسد، چقدر است؟

● حل: این مسئله از نوع دستهٔ اول است که با ترسیم دیاگرام سه فازی و اطلاعات داده شده برای این خاک، خواهیم داشت:



$$\frac{۱}{۵}x + x = ۶۰۰۰ \Rightarrow x = ۵۰۰۰\ gr \Rightarrow W_s = ۵۰۰۰\ gr$$

و یا می‌توان W_s را به‌صورت زیر نیز محاسبه کرد:

$$W_{\text{کل}} = (۱+\omega)W_s \Rightarrow ۶۰۰۰ = (۱+۰/۲)W_s \Rightarrow W_s = ۵۰۰۰\ gr$$

در ادامه با توجه به اینکه تغییر رطوبت ۵ درصد یا ۰/۰۵ در خاک رخ داده است، با یک ابتکار ساده به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \xrightarrow{\text{از طرفین } \Delta \text{ می‌گیریم}} \Delta\omega = \Delta\left(\frac{W_w}{W_s}\right) = \frac{\Delta W_w}{W_s} \Rightarrow ۰/۰۵ = \frac{\Delta W_w}{۵۰۰۰} \Rightarrow \Delta W_w = ۲۵۰\ gr \Rightarrow \Delta V_w = ۲۵۰\ cm^۳$$

یعنی با اضافه کردن $۲۵۰\ cm^۳$ آب به خاک موردنظر، درصد رطوبت آن ٪۵ افزایش یافته و ۱/۲۵ برابر شده است.

تمرین ۱۸: درصد رطوبت در یک خاک مرطوب برابر ٪۲۰ و وزن آن ۳۰۰ گرم است. اگر حجم خاک ۱۸۰ سانتی‌متر مکعب باشد، درصد اشباع آن را محاسبه کنید. ($G_s = ۲/۵$)

● حل: این مسئله از نوع دستهٔ اول است که در آن درصد اشباع خاک خواسته شده است. برای شروع، ابتدا با داشتن مقادیر W و ω، وزن آب و دانه‌های جامد خاک را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$W = (۱+\omega)W_s \Rightarrow ۳۰۰ = (۱+۰/۲) \times W_s \Rightarrow W_s = ۲۵۰\ gr$$

$$W_w = W - W_s = ۳۰۰ - ۲۵۰ = ۵۰\ gr \Rightarrow V_w = ۵۰\ cm^۳$$

حال در ادامه با توجه به اینکه G_s، W_s و γ_w معلوم هستند، مقدار V_s را به‌دست می‌آوریم:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s\,\gamma_w} \Rightarrow ۲/۵ = \frac{۲۵۰}{V_s \times ۱} \Rightarrow V_s = ۱۰۰\ cm^۳$$

و سپس می‌نویسیم:

$$V_v = V - V_s = ۱۸۰ - ۱۰۰ = ۸۰\ cm^۳$$

و در نهایت درصد اشباع خاک برابر می‌شود با:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{۵۰}{۸۰} = ۰/۶۲۵ = ۶۲/۵\%$$

تمرین ۱۹: **یک خاک قرضه با وزن مخصوص خشک $1600\ kg/m^3$ و رطوبت طبیعی ۲۵ درصد برای اجرای یک خاکریز متراکم به‌کار می‌رود. مقدار آب موجود در یک متر مکعب از این خاک چند کیلوگرم است؟**

حل: با توجه به اینکه در صورت سؤال مقدار γ_d داده شده است، مسئله از نوع دستهٔ دوم بوده و خواهیم داشت:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \Rightarrow 1600 = \frac{W_s}{1} \Rightarrow W_s = 1600\ kg$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \Rightarrow 0/25 = \frac{W_w}{1600} \Rightarrow W_w = 400\ kg$$

تمرین ۲۰: **یک لایه خاک با وزن مخصوص $1/5\ gr/cm^3$، تودهٔ ویژه ۲/۵ و رطوبت ۲۰ درصد، زیر باران قرار می‌گیرد. اگر در طول بارندگی حجم لایهٔ خاک ثابت بماند، افزایش درصد رطوبت خاک پس از اشباع کامل لایهٔ خاک چند درصد است؟** (سراسری - ۹۲)

۱) ۱۰ ۲) ۵ ۳) ۱۵ ۴) ۲۰

حل: با توجه به اینکه در صورت سؤال مقدار γ داده شده است، بنابراین مسئله از نوع دستهٔ دوم بوده و با استفاده از رابطهٔ وزن مخصوص و نیز روابط وزنی و حجمی پایه، مسئله را حل می‌کنیم.

در حالت اول و قبل از بارندگی داریم:

$$\gamma = \frac{G_s(1+\omega)}{1+e}\gamma_w \Rightarrow 1/5 = \frac{2/5\times(1+0/2)}{1+e}\times 1 \Rightarrow e = 1$$

پس از بارندگی خاک اشباع می‌شود و $S_r = 1$ است ولی چون حجم خاک تغییر نمی‌کند، e نیز تغییر نکرده و همان $e = 1$ است. در این حالت می‌توان نوشت:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow \omega \times 2/5 = 1\times 1 \Rightarrow \omega = 0/4 = 40\%$$

پس افزایش درصد رطوبت خاک برابر است با:

$$\Delta\omega = 40\% - 20\% = 20\%$$

تمرین ۲۱: **در یک نمونه خاک اشباع با رطوبت ۴۰ درصد، نسبت تخلخل دو برابر پوکی است. وزن مخصوص خاک در این حالت چقدر است؟ ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$)**

حل: در این سؤال وزن مخصوص خاک در حالت اشباع خواسته شده است و ما با یک مسئله از نوع دستهٔ دوم مواجهیم. پس با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال می‌نویسیم:

$$e = 2n \Rightarrow e = 2\times\frac{e}{1+e} \Rightarrow e^2 + e = 2e \Rightarrow e = 1$$

خاک اشباع است

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow 0/4\times G_s = 1\times 1 \Rightarrow G_s = 2/5$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2/5+1}{1+1}\times 10 = 17/5\ kN/m^3$$

بررسی یک نکته کاربردی

اگر بدون تغییر در حجم خاک رطوبت آن‌را تغییر دهیم، چون وزن دانه‌های جامد و حجم خاک تغییر نمی‌کنند، وزن مخصوص خشک خاک نیز ثابت خواهد ماند. در این حالت می‌توان نوشت:

$$W_{s(1)} = W_{s(2)} \xrightarrow{V_1 = V_2} \gamma_{d_1} = \gamma_{d_2} \Rightarrow \boxed{\frac{\gamma_1}{1+\omega_1} = \frac{\gamma_2}{1+\omega_2}}$$

تمرین ۲۲: **وزن مخصوص خاکی در حالت طبیعی $1/6\ gr/cm^3$ می‌باشد. اگر رطوبت خاک را ۱/۵ برابر رطوبت اولیه نمائیم، وزن مخصوص $1/7\ gr/cm^3$ به‌دست می‌آید. درصد رطوبت اولیه خاک چقدر است؟** (سراسری - ۸۸)

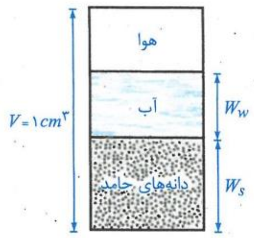
۱) ۱۰ ۲) ۱۲ ۳) ۱۴ ۴) ۱۶

حل:

روش اول: با توجه به نکتهٔ ارائه شده و با فرض اینکه خاک تغییر حجم نمی‌دهد، می‌توان نوشت:

$$\gamma_{d_1} = \gamma_{d_2} \Rightarrow \frac{\gamma_1}{1+\omega_1} = \frac{\gamma_2}{1+\omega_2} \Rightarrow \frac{1/6}{1+\omega_1} = \frac{1/7}{1+1/5\,\omega_1} \Rightarrow \omega_1 = 0/14 \quad \text{یا} \quad 14\%$$

روش دوم: اگر فرض کنیم که $1\ cm^3$ از این خاک را برداشته‌ایم، در آن‌صورت خواهیم داشت:



$$\begin{cases} \gamma_{t_1} = \dfrac{W_w + W_s}{۱} = ۱/۶ & (۱) \\ \gamma_{t_۲} = \dfrac{۱/۵\ W_w + W_s}{۱} = ۱/۷ & (۲) \end{cases}$$

$$\xrightarrow{\text{از معادلات (۱) و(۲)}} W_w = ۰/۲\ gr \quad , \quad W_s = ۱/۴\ gr$$

محاسبهٔ درصد رطوبت اولیه: $\omega_1 = \dfrac{W_w}{W_s} = \dfrac{۰/۲}{۱/۴} = \dfrac{۱}{۷} = ۰/۱۴$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

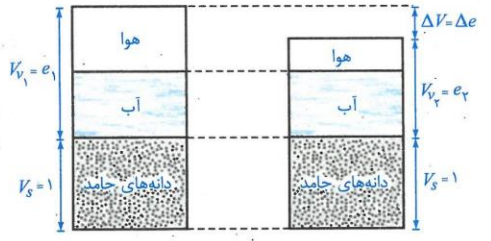
C-۲- بررسی موضوعات خاص در مسائل

در این بخش به بررسی مسائل ترکیبی با دیدگاه‌های خاص می‌پردازیم و شما را با موضوعاتی آشنا می‌کنیم که اگرچه بر پایهٔ روابط وزنی و حجمی خوانده شده می‌باشند، ولی تفکر اصلی آنها برای شما جدید است.

۱- مفاهیم اولیه تراکم خاک قرضه

فرض کنید خاکی با حجم V_1 و نسبت تخلخل e_1 را مطابق شکل زیر از یک منبع قرضه برداشته و می‌خواهیم آن را در محل دیگری متراکم کنیم، به‌طوری‌که حجم و نسبت تخلخل آن به‌ترتیب برابر $V_۲$ و $e_۲$ شوند.

در اثر متراکم شدن خاک قرضه، مقداری از هوای موجود در خاک خارج شده و حجم آن کاهش می‌یابد. شما می‌توانید این کاهش حجم خاک را در دیاگرام سه فازی زیر که در آن $V_s = ۱$ فرض شده است، ببینید:



با توجه به دیاگرام سه فازی نشان داده شده، می‌توان به نکات مهم زیر اشاره کرد:

۱) با متراکم کردن خاک، مقداری از هوای موجود در خاک خارج شده و این باعث می‌شود که نسبت تخلخل خاک نیز کاهش یافته و از e_1 به $e_۲$ برسد.

۲) با توجه به اینکه حجم خاک کاهش یافته است، با کمک دیاگرام سه فازی رسم شده، به‌سادگی می‌توان حجم خاک در دو حالت را مقایسه کرد:

$$\begin{cases} \text{حجم اولیه} : V_1 = ۱+e_1 \\ \text{حجم ثانویه} : V_۲ = ۱+e_۲ \end{cases} \xrightarrow{\text{تقسیم طرفین دو رابطه بر هم}} \boxed{\dfrac{V_1}{V_۲} = \dfrac{۱+e_1}{۱+e_۲}}$$

۳) اگر تغییر حجم خاک را با ΔV و حجم اولیهٔ خاک را با V_1 نشان دهیم، در آن‌صورت تغییر حجم نسبی خاک برابر است با:

$$\begin{cases} V_1 = ۱+e_1 \\ V_۲ = ۱+e_۲ \end{cases} \Rightarrow \dfrac{\Delta V}{V_1} = \dfrac{(۱+e_1)-(۱+e_۲)}{۱+e_1} = \dfrac{e_1 - e_۲}{۱+e_1} \Rightarrow \boxed{\dfrac{\Delta V}{V_1} = \dfrac{\Delta e}{۱+e_1}}$$

۴) همانطور که مشاهده می‌کنید با کوبیدن خاک و متراکم کردن آن، وزن و حجم قسمت جامد خاک تغییر نمی‌کند. از این موضوع که در حل مسائل زیادی کاربرد دارد، می‌توان به‌صورت زیر استفاده کرد:

$$\begin{cases} \gamma_{d_1} = \dfrac{W_s}{V_1} \Rightarrow W_s = \gamma_{d_1} V_1 \\ \gamma_{d_2} = \dfrac{W_s}{V_2} \Rightarrow W_s = \gamma_{d_2} V_2 \end{cases} \Rightarrow \boxed{\gamma_{d_1} V_1 = \gamma_{d_2} V_2}$$

۵) روابط به‌دست آمده در موارد گفته شدهٔ بالا، در صورت تغییر رطوبت خاک قرضه در هنگام حمل به محل کارگاه نیز برقرار می‌باشند. به عبارت دیگر این روابط ربطی به میزان آب موجود در خاک ندارند.

در ادامه با حل چند تمرین، کاربرد نکات فوق را در حل مسائل یاد می‌گیریم:

تمرین ۲۳: از منبع قرضه‌ای با نسبت منافذ $e = 0/8$، به میزان ۱۲۰۰ متر مکعب خاک برداشت می‌گردد. چند متر مکعب خاکریز با نسبت منافذ $e = 0/5$ می‌توان از این منبع قرضه ساخت؟ (سراسری - ۹۱)

۱) ۱۰۰۰ ۲) ۱۲۴۰۰ ۳) ۱۶۲۰ ۴) ۱۴۴۰

حل: با توجه به کاهش نسبت تخلخل خاک قرضه، می‌توان گفت که خاک مورد نظر متراکم شده و حجم آن کاهش یافته است. بنابراین فقط گزینه (۱) که از $1200\,m^3$ کوچکتر است، می‌تواند صحیح باشد. اما اگر بخواهیم با حل این سؤال به جواب دقیق برسیم، می‌نویسیم:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1+e_2}{1+e_1} \Rightarrow \frac{V_2}{1200} = \frac{1+0/5}{1+0/8} \Rightarrow V_2 = 1000\,m^3$$

بنابراین گزینهٔ (۱) درست است.

تمرین ۲۴: یک خاک درشت‌دانه با نسبت تخلخل اولیه ۱/۵، در اثر متراکم شدن ۲۰ درصد کاهش حجم می‌دهد. میزان کاهش نسبت تخلخل خاک در این حالت چقدر است؟

۱) ۱۶/۷٪ ۲) ۲۰٪ ۳) ۳۳٪ ۴) ۵۰٪

حل: با توجه به مفاهیمی که در این قسمت به آن اشاره کردیم، می‌نویسیم:

$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{\Delta e}{1+e_1} \Rightarrow \frac{V_1 - 0/8\,V_1}{V_1} = \frac{e_1 - e_2}{1+e_1} \Rightarrow 0/2 = \frac{1/5 - e_2}{1+1/5} \Rightarrow e_2 = 1 \Rightarrow \frac{e_2}{e_1} = \frac{1}{1/5} = 0/67 = 67\%$$

یعنی نسبت تخلخل خاک ۳۳٪ کاهش یافته است و گزینهٔ (۳) درست است.

تمرین ۲۵: خاکی در حالت طبیعی خود در یک منبع قرضه دارای ۱۰٪ رطوبت و وزن مخصوص $16/5\,kN/m^3$ است. این خاک را به محل کارگاه موردنظر منتقل کرده و ضمن افزایش رطوبت آن تا ۱۵٪، خاک را نیز متراکم می‌کنیم تا وزن مخصوص آن به $20/7\,kN/m^3$ برسد.

الف) برای یک متر مکعب خاک متراکم، چند متر مکعب از خاک طبیعی نیاز است؟

ب) در این عملیات خاکی چه حجمی از آب (بر حسب cm^3) به خاک قرضه اضافه شده است؟

حل:

الف) با توجه به اینکه وزن دانه‌های جامد خاک تغییر نکرده است، می‌نویسیم:

$$W_{s_1} = W_{s_2} \Rightarrow \gamma_{d_1} V_1 = \gamma_{d_2} V_2 \Rightarrow \frac{\gamma_1}{1+\omega_1} \times V_1 = \frac{\gamma_2}{1+\omega_2} \times V_2 \Rightarrow \frac{16/5}{1+0/1} \times V_1 = \frac{20/7}{1+0/15} \times 1 \Rightarrow V_1 = 1/2\,m^3$$

ب) مقدار آب اضافه شده به خاک را می‌توان از تفاضل وزن خاک در قبل و بعد از تراکم به‌دست آورد، زیرا با متراکم شدن خاک، وزن دانه‌های جامد ثابت بوده و تغییر نمی‌کند. پس تغییر در وزن خاک، ناشی از تغییر در وزن آب است.

$$\Delta W_w = W_2 - W_1 = \gamma_2 V_2 - \gamma_1 V_1 = 20/7 \times 1 - 16/5 \times 1/2 = 0/9\,kN$$

$$\Delta V_w = \frac{\Delta W_w}{\gamma_w} = \frac{0/9}{10} = 0/09\,m^3 = 90000\,cm^3$$

۲- چگونگی اشباع کردن یک خاک

در عمل برای اشباع کردن خاک دو روش وجود دارد:

۱) با اضافه کردن آب و بدون تغییر در حجم خاک، فضای خالی را از آب پر کرده و خاک را اشباع می‌کنیم. در این روش به علت عدم تغییر حجم خاک، γ_d و e تغییر نمی‌کنند.

$$\uparrow S_r = \frac{V_w \uparrow}{\boxed{V_v}} \rightarrow \text{ثابت می‌ماند}$$

۲) با کاهش حجم خاک و بدون تغییر در رطوبت آن، هوای موجود در فضای خالی را خارج کرده و خاک را اشباع می‌کنیم. در این روش اگر چه وزن خاک تغییر نمی‌کند ولی با کاهش پیوستهٔ حجم، γ_d مرتباً افزایش پیدا می‌کند تا وقتی که همهٔ هوای خاک خارج شود. در این لحظه γ_d بیشترین مقدار خود را دارد.

$$\uparrow S_r = \frac{\boxed{V_w}}{V_v \downarrow} \quad (V_w \rightarrow \text{ثابت می‌ماند})$$

$$S_r \uparrow e \downarrow = \omega G_s = const \ (\text{ثابت}) \xrightarrow{S_r = 100\%} e_{min} = \omega G_s$$

$$\gamma_{d_{max}} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{min}} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \omega G_s}$$

تمرین ۴۶: در یک خاک با تودهٔ ویژهٔ $G_s = 2/5$ و $\omega = 10\%$، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک که طی عمل تراکم و بدون تغییر در میزان رطوبت حاصل می‌شود، چند t/m^3 است؟

● حل: حداکثر وزن مخصوص خشک خاک در اثر عمل تراکم زمانی به‌دست می‌آید که خاک اشباع شود، یعنی:

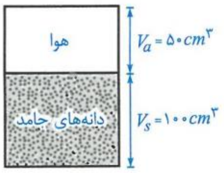
$$\omega G_s = S_r e \xrightarrow[e = e_{min}]{S_r = 1} e_{min} = \omega G_s = 0/1 \times 2/5 = 0/25$$

$$\gamma_{d_{max}} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{min}} = \frac{2/5 \times 1}{1 + 0/25} = 2\, t/m^3$$

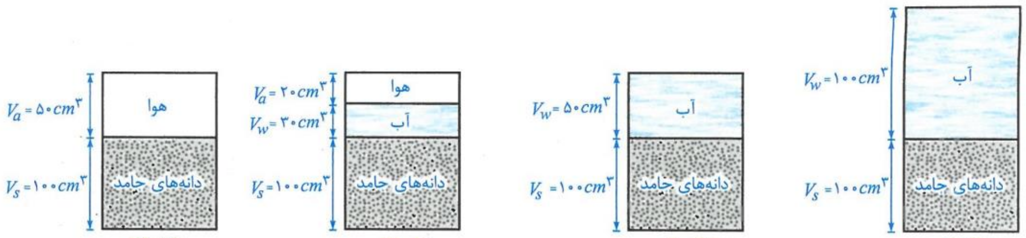
تذکر: $\gamma_w = 1\, gr/cm^3 = 1\, t/m^3$

۳- درک و تحلیل حالت فوق اشباع در حل مسائل وزنی و حجمی

خاک خشک شکل مقابل را در نظر بگیرید که دیاگرام سه فازیِ آن ترسیم شده است:



فرض کنید می‌خواهیم $100 cm^3$ آب را به‌تدریج به این خاک اضافه کنیم. تغییراتی‌که در دیاگرام سه فازی این خاک رخ می‌دهد، به‌صورت زیر است:



شکل (۱) (خاک خشک) — شکل (۲) اضافه کردن $30 cm^3$ آب (خاک مرطوب) — شکل (۳) اضافه کردن $50 cm^3$ آب (خاک اشباع) — شکل (۴) اضافه کردن $100 cm^3$ آب (خاک فوق اشباع)

در ادامه می‌خواهیم شرایطی که برای این خاک رخ داده است را با بررسی چند سؤال تحلیل کنیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: روند تغییرات درصد رطوبت خاک از شکل (۱) تا (۴) چگونه است؟

پاسخ: از شکل (۱) تا (۴) درصد رطوبت خاک در حال افزایش است، زیرا W_s ثابت بوده و W_w به‌طور پیوسته زیاد می‌شود.

$$\uparrow \omega = \frac{W_w \uparrow}{W_s} \Rightarrow \omega_1 = 0 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4$$

(W_s: ثابت می‌ماند)

سؤال ۲: درصد اشباع خاک از شکل (۱) تا (۴) چگونه تغییر می‌کند؟

پاسخ: در شکل (۱) خاک خشک بوده و درصد اشباع آن صفر است و در شکل (۳) خاک اشباع شده و درصد اشباع آن بـه ۱۰۰ رسـیده است. پس ما از شکل (۱) تا (۳) با یک روند افزایشی برای درصد اشباع مواجه بوده‌ایم. اما جالب است که بدانید بعد از شکل (۳) و اشـباع شدن کامل خاک، دیگر اضافه شدن آب باعث افزایش درصد اشباع نخواهد شد. علت این موضوع آن است که از این بعد هر چقدر کـه V_w زیاد می‌شود، V_v هم زیاد خواهد شد و همواره V_w مساوی V_v باقی خواهد ماند. در چنین شرایطی می‌گوییم خاک در **حالت فوق اشـباع** قرار دارد.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

(V_w: همواره افزایش می‌یابد)

از شکل (۱) تا (۳) ← V_v ثابت است و با افزایش V_w، درصد اشباع (S_r) نیز افزایش می‌یابد.

از شکل (۳) به بعد ← V_v با V_w مساوی بوده و با افزایش آب، این دو با هم افزایش می‌یابند، بنابراین S_r، ثابت و برابر ٪۱۰۰ است.

سؤال ۳: با توجه به دو سؤال قبلی آیا می‌توان گفت که اگر درصد رطوبت یک خاک افزایش یابد، درصد اشباع خاک نیز لزوماً افزایش می‌یابد؟

پاسخ: خیر، همانطور که مشاهده کردید، در مرحلهٔ فوق اشباع با اضافه کردن آب، درصد رطوبت خاک افزایش می‌یابد ولی درصد اشباع خاک ثابت می‌ماند.

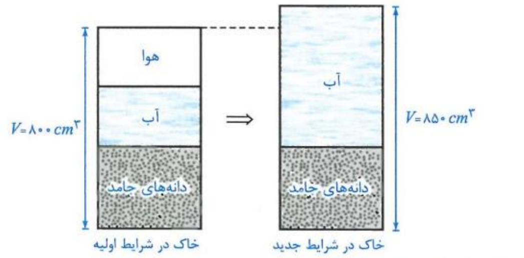
سؤال ۴: چگونه می‌توان شرایط فوق اشباع را در یک خاک تشخیص داد؟

پاسخ: در شرایط فوق اشباع با تغییر در میزان رطوبت خاک (افزایش یا کاهش ω)، حجم خاک نیز تغییر می‌کند. بنابراین اگر دیدید که خاکی در اثر تغییر در رطوبتش تغییر حجم داد، بدانید که در شرایط فوق اشباع است.

لازم به ذکر است که شرایط فوق اشباع در انواع رس‌ها مثـل مونـت موریلونیـت‌هـا، ایلیـت‌هـا و کائولینیـت‌هـا بیـشتر مطـرح بـوده و در درشت‌دانه‌ها کمتر اتفاق می‌افتد.

در ادامه با حل چند تمرین، مفهوم خاک فوق اشباع را بهتر درک می‌کنیم.

تمرین ۲۷: برروی خاکی با رطوبت ٪۲۰، $250cc$ آب اضافه شده و حجم آن از $800cc$ به $850cc$ رسیده است. در صورتی‌که چگالی دانه‌ها ۲/۵ باشد، درجه اشباع اولیه خاک را تعیین کنید.



خاک در شرایط اولیه — خاک در شرایط جدید

حل: از $250cc$ ($250cm^3$) آب اضـافه شـده، $200cc$ از آن صـرف پرکردن حفره‌هـای هـوا و $50cc$ دیگـر، باعـث افـزایش حجـم نمونـه گردیده است، بنابراین خاک در شرایط فوق اشباع قرار می‌گیرد. بـا در نظر گرفتن دیاگرام‌های سه فازی در حالت‌های اولیه و جدیـد خـاک و نیز باتوجه به اینکه حجم اولیهٔ خاک برابر $800cc$ می‌باشـد، مـی‌تـوان نوشت:

(حجم هوایی که با آب پر شده است: ۲۰۰)

حالت اولیه
$$\begin{cases} V_s + V_w = V - V_a = 800 - 200 = 600cc \\ \omega = \dfrac{W_w}{W_s} = \dfrac{V_w \times \gamma_w}{V_s \times \gamma_s} = \dfrac{V_w}{V_s \times G_s} \Rightarrow 0/2 = \dfrac{V_w}{V_s \times 2/5} \Rightarrow \dfrac{V_w}{V_s} = 0/5 \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_s + 0/5V_s = 600 \Rightarrow V_s = 400cc \ , \ V_w = 0/5 \times 400 = 200cc$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{200}{800 - 400} = 0/5$$

($V_v = V - V_s$)

تمرین ۴۸: اگر حجم آب موجود در خاکی را سه‌برابر کنیم: (سراسری - ۸۰)

۱) درصد رطوبت خاک سه برابر می‌شود.
۲) درجه اشباع خاک سه‌برابر می‌شود.
۳) درصد رطوبت و درجه اشباع خاک سه‌برابر می‌شوند.
۴) درجه اشباع خاک ثابت ولی درصد رطوبت آن سه‌برابر می‌شود.

حل: سه برابر شدن حجم آب موجود در خاک، به معنی سه‌برابر شدن وزن آب نیز می‌باشد که باتوجه به ثابت بودن وزن دانه‌های جامد، نتیجه می‌شود که میزان رطوبت خاک نیز سه‌برابر خواهد شد:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \Rightarrow \omega \text{ سه برابر می‌شود}$$

(W_w: سه برابر شده است. W_s: ثابت است)

اما با سه برابر شدن حجم آب نمی‌توان به‌طور دقیق درمورد تغییرات درجه اشباع اظهارنظر کرد. در این حالت بایستی حتماً درجه اشباع اولیه خاک مشخص باشد.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \Rightarrow \begin{cases} (S_r)_{\text{اولیه}} \le \frac{1}{3} \Rightarrow V_v \text{ ثابت می‌ماند} \Rightarrow S_r \text{ سه برابر خواهد شد} \\ \frac{1}{3} < (S_r)_{\text{اولیه}} < 1 \Rightarrow V_v \text{ زیاد می‌شود ولی سه برابر نمی‌شود} \Rightarrow S_r \text{ زیاد می‌شود ولی کمتر از سه برابر می‌شود} \\ (S_r)_{\text{اولیه}} = 1 \Rightarrow V_v \text{ سه برابر می‌شود} \Rightarrow S_r \text{ ثابت می‌ماند} \end{cases}$$

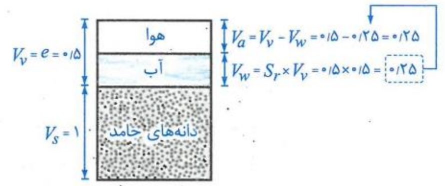
(V_w: سه برابر شده است. V_v: ?)

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

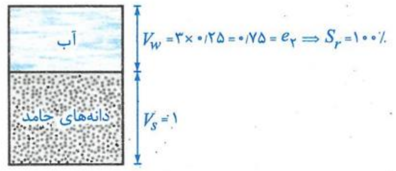
تمرین ۴۹: در یک خاک رسی درصد اشباع برابر $S_r = 50\%$ و نشانهٔ خلاء $e = 0/5$ می‌باشد. اگر حجم آب موجود در خاک را سه برابر کنیم، در آن‌صورت نشانهٔ خلاء و درصد اشباع خاک به‌ترتیب چند برابر می‌شوند؟

۱) ۱/۵ و ۳
۲) ۱/۵ و ۲
۳) ۰/۷۵ و ۳
۴) ۰/۷۵ و ۲

حل: برای درک راحت‌تر این سؤال از دیاگرام سه فازی با $V_s = 1$ استفاده می‌کنیم. همانطورکه ملاحظه می‌کنید، در تکمیل مقادیر نشان داده شده در شکل، ابتدا V_v، سپس V_w و در نهایت V_a را به‌دست آورده‌ایم.



حال اگر حجم آب (V_w) سه برابر شود، در آن‌صورت خاک به حالت فوق اشباع در آمده و دیاگرام سه فازی آن به‌صورت زیر خواهد بود:

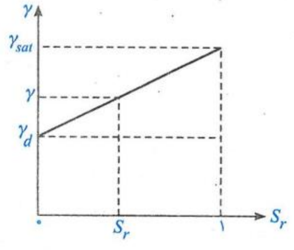


پس با مقایسه این دو حالت می‌توان نوشت:

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{0/75}{0/5} = 1/5 \quad , \quad \frac{S_{r_2}}{S_{r_1}} = \frac{100}{50} = 2 \Rightarrow \text{گزینهٔ (۲) درست است}$$

۴- ارتباط بین وزن مخصوص‌های یک خاک

به‌طور کلی در یک خاک با افزایش درصد اشباع (S_r)، وزن مخصوص خاک به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و نمودار آن به‌صورت مقابل خواهد بود.



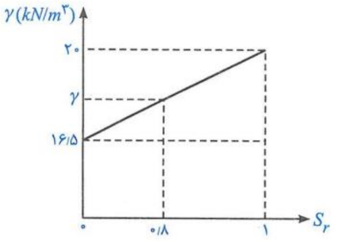
با توجه به این نمودار می‌توان رابطهٔ بین وزن مخصوص‌های خاک را با کمک قضیهٔ تالس به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\frac{\gamma_{sat} - \gamma_d}{\gamma - \gamma_d} = \frac{1 - 0}{S_r - 0} \Rightarrow \gamma = (\gamma_{sat} - \gamma_d) S_r + \gamma_d$$

لازم به ذکر است که استفاده از تکنیک صفحهٔ قبل، در برخی از سؤالات روند حل مسئله را بسیار کوتاه می‌کند. برای درک بهتر این موضوع به تمرین زیر توجه کنید:

تمرین ۳۰: وزن مخصوص حالت خشک و اشباع یک نمونه خاک طبیعی با درصد اشباع ٪۸۰ به‌ترتیب برابر $16.5\ kN/m^3$ و $20\ kN/m^3$ می‌باشند. وزن مخصوص طبیعی خاک چقدر است؟

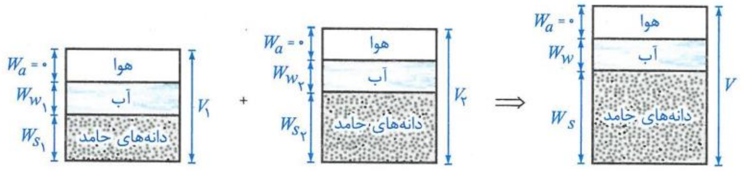
● حل: با ترسیم نمودار $(\gamma - S_r)$ و استفاده از قضیه تالس می‌نویسیم:



$$\frac{20-16.5}{\gamma-16.5}=\frac{1-0}{0.8-0} \Rightarrow \gamma = 19.3\ kN/m^3$$

۵- ترکیب مصالح دو منبع قرضه

اگر V_1 متر مکعب از خاک قرضهٔ (۱) با رطوبت ω_1 و وزن مخصوص خشک γ_{d_1} با V_2 متر مکعب از خاک قرضهٔ (۲) با رطوبت ω_2 و وزن مخصوص خشک γ_{d_2} ترکیب شود و خاک جدیدی با حجم V، رطوبت ω و وزن مخصوص خشک γ_d بسازد، در آن‌صورت با فرض کم یا زیاد نکردن آب در این ترکیب، می‌توان با کمک دو معادلهٔ زیر، درصد حجمی خاک‌های قرضه (۱) و (۲) را در این اختلاط به‌دست آورد:



$$\begin{cases} W_{s_1}+W_{s_2}=W_s \xrightarrow{W_s=\gamma_d V} \gamma_{d_1}V_1+\gamma_{d_2}V_2=\gamma_d V \\ W_{w_1}+W_{w_2}=W_w \xrightarrow{W_w=\omega W_s=\omega\gamma_d V} \omega_1\gamma_{d_1}V_1+\omega_2\gamma_{d_2}V_2=\omega\gamma_d V \end{cases}$$

در ادامه با حل دو تست، این موضوع را بهتر درک می‌کنیم.

تمرین ۳۱: مصالح یک منبع قرضه هم به‌صورت اشباع با $\gamma_{sat}=20\ kN/m^3$ و هم به‌صورت خشک با $\gamma_d=16\ kN/m^3$ موجود است. جهت اجرای $40\ m^3$ خاکریز با وزن مخصوص خشک $\gamma_d=18\ kN/m^3$، به‌ترتیب چند متر مکعب از مصالح خشک و اشباع باید اضافه شود تا درصد رطوبت مخلوط، بدون اضافه یا کم کردن آب به ۱۰ درصد برسد؟

۱) $25\ m^3$ و $20\ m^3$ ۲) $27\ m^3$ و $18\ m^3$ ۳) $22\ m^3$ و $18\ m^3$ ۴) $24\ m^3$ و $16\ m^3$

● حل: چون هر دو قرضهٔ اشباع و خشک از یک منبع هستند، بنابراین وزن مخصوص‌های خشکشان با هم و وزن مخصوص‌های اشباع‌شان نیز با هم برابر است. در ادامه قرضه خشک را با اندیس (۱) و قرضهٔ اشباع را با اندیس (۲) نشان می‌دهیم و خواهیم داشت:

$$W_{s_1}+W_{s_2}=W_s \Rightarrow \gamma_{d_1}V_1+\gamma_{d_2}V_2=\gamma_d V \Rightarrow 16\times V_1+16\times V_2=18\times 40 \Rightarrow V_1+V_2=45\ m^3$$

$$\gamma_{d_2}=\frac{\gamma_2}{1+\omega_2} \Rightarrow 16=\frac{20}{1+\omega_2} \Rightarrow \omega_2=0.25$$

$$W_{w_1}+W_{w_2}=W_w \Rightarrow 0+\gamma_{d_2}V_2\,\omega_2=\gamma_d V\omega \Rightarrow 16\times V_2\times 0.25=18\times 40\times 0.1 \Rightarrow V_2=18\ m^3 \Rightarrow V_1=45-18=27\ m^3$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

تمرین ۳۲: مصالح یک منبع قرضه به دو صورت خشک ($\gamma_d=16\ kN/m^3$) و اشباع ($\gamma_{sat}=22\ kN/m^3$) وجود دارد. برای داشتن خاک با درصد رطوبت $\omega=20\%$ مصالح خشک و اشباع به چه نسبتی باید برداشت شده و مخلوط گردند؟ (سراسری - ۸۷)

۱) ۲۷ درصد خاک خشک و ۷۳ درصد خاک اشباع
۲) ۴۷ درصد خاک خشک و ۵۳ درصد خاک اشباع
۳) ۵۳ درصد خاک خشک و ۴۷ درصد خاک اشباع
۴) ۷۳ درصد خاک خشک و ۲۷ درصد خاک اشباع

مشابه با حل تمرین قبل خاک خشک را با اندیس (۱) و خاک اشباع را با اندیس (۲) نشان داده و می‌نویسیم:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} \Rightarrow \gamma_{d_۲} = \frac{\gamma_۲}{1+\omega_۲} \Rightarrow ۱۶ = \frac{۲۲}{1+\omega_۲} \Rightarrow \omega_۲ = ۰/۳۷۵$$

$\omega_۱ = ۰$ (خاک خشک است)

$$W_{s_۱} + W_{s_۲} = W_s \Rightarrow \gamma_{d_۱} V_۱ + \gamma_{d_۲} V_۲ = \gamma_d V = \gamma_d (V_۱ + V_۲) \Rightarrow ۱۶ \times V_۱ + ۱۶ \times V_۲ = \gamma_d (V_۱ + V_۲)$$

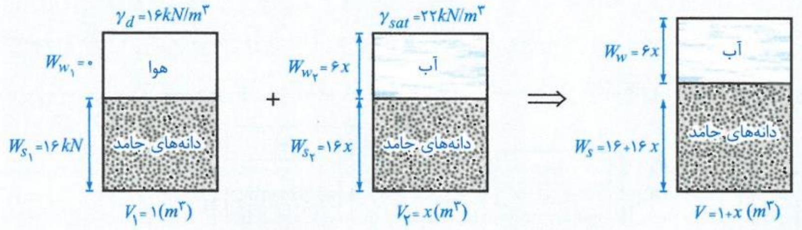
$$\Rightarrow ۱۶ \times (V_۱ + V_۲) = \gamma_d \times (V_۱ + V_۲) \Rightarrow \gamma_d = ۱۶\, kN/m^۳$$

$$W_{w_۱} + W_{w_۲} = W_w \Rightarrow ۰ + \gamma_{d_۲} V_۲ \omega_۲ = \gamma_d V \omega \Rightarrow ۱۶ \times V_۲ \times ۰/۳۷۵ = ۱۶ \times V \times ۰/۲ \Rightarrow V_۲ = ۰/۵۳V \;,\; V_۱ = V - ۰/۵۳V = ۰/۴۷V$$

بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح این تست است.

کمی خلاقیت

این تست را می‌توانید با ترسیم دیاگرام سه فازی خاک‌های (۱)، (۲) و خاک مخلوط، با فرض اینکه یک متر مکعب خاک خشک را با x متر مکعب خاک اشباع ترکیب کرده و $(x+۱)$ متر مکعب خاک با رطوبت ۰/۲ به‌دست آمده است، به‌صورت زیر نیز حل کنید:



$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \Rightarrow ۰/۲ = \frac{۶x}{۱۶ + ۱۶x} \Rightarrow x = \frac{۸}{۷}$$

$$\text{نسبت خاک خشک} = \frac{V_۱}{V} = \frac{۱}{1+x} = \frac{۱}{1+\frac{۸}{۷}} \simeq ۰/۴۷ \quad , \quad \text{نسبت خاک اشباع} = ۱ - ۰/۴۷ = ۰/۵۳$$

تمرین ۳۳: یک تکهٔ دست‌نخورده و خشک از خاکی به وزن ۵۰۰ گرم را با ۹ گرم پارافین آغشته کرده و در داخل ظرف مدرجی قرار می‌دهیم. در این حالت حجم آب ظرف $۳۱۰ cm^۳$ جابجا می‌گردد. اگر چگالی دانه‌های جامد خاک برابر $G_s = ۲/۵$ و وزن مخصوص پارافین $۰/۹\ gr/cm^۳$ باشد، تخلخل خاک (n) چقدر است؟

حل: پارافین به‌صورت یک غشاء نازک اطراف تودهٔ خاک را احاطه کرده و در حفرات آن نفوذ نمی‌کند، بنابراین میزان جابه‌جایی آب در ظرف، برابر مجموع حجم خاک و پارافین است. برای شروع ابتدا حجم پارافین را محاسبه می‌کنیم تا با کسر آن از حجم آب جابه‌جا شده، حجم خاک به‌دست آید:

$$V_{\text{پارافین}} = \frac{W_{\text{پارافین}}}{\gamma_{\text{پارافین}}} = \frac{۹}{۰/۹} = ۱۰ cm^۳$$

$$V_{\text{خاک}} = V_{\text{آب جابه‌جا شده}} - V_{\text{پارافین}} = ۳۱۰ - ۱۰ = ۳۰۰ cm^۳$$

حال در ادامه با دانستن مقدار وزن خشک خاک (یا همان وزن دانه‌های جامد $= W_s$)، به‌صورت زیر نسبت تخلخل و در نهایت تخلخل خاک را می‌یابیم:

$$W_s = ۵۰۰ gr \quad , \quad \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \Rightarrow \frac{۵۰۰}{۳۰۰} = \frac{۲/۵ \times ۱}{1+e} \Rightarrow e = ۰/۵$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{۰/۵}{۱+۰/۵} = \frac{۱}{۳} = ۰/۳۳$$

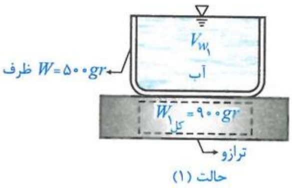
تذکر: در حل این سؤال می‌توانیم پس از تعیین $V_{\text{خاک}}$، ابتدا با استفاده از وزن خاک (که در حالت خشک همان W_s است) و چگالی دانه‌های جامد، حجم قسمت جامد و از آنجا حجم حفرات را نیز بیابیم:

$$\begin{cases} V_s = \dfrac{W_s}{G_s \gamma_w} = \dfrac{۵۰۰}{۲/۵ \times ۱} = ۲۰۰ cm^۳ \\ V_v = V - V_s = ۳۰۰ - ۲۰۰ = ۱۰۰ cm^۳ \end{cases} \Rightarrow n = \frac{V_v}{V} = \frac{۱۰۰}{۳۰۰} = ۰/۳۳$$

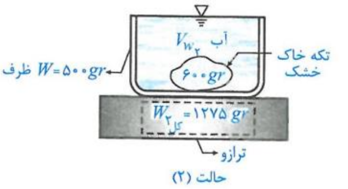
تمرین ۳۴: یک ظرف استوانه‌ای به وزن ۵۰۰ گرم را با آب پر می‌کنیم، در این حالت وزن آب و ظرف برابر ۹۰۰ گرم می‌شود. حال اگر یک تکه خاک خشک به وزن ۶۰۰ گرم را درون این ظرف قرار داده و سپس ظرف را توسط آب پرکنیم، وزن مجموعه برابر ۱۲۷۵ گرم خواهد شد. چگالی دانه‌های جامد خاک را به‌دست آورید.

۱) ۲/۵ ۲) ۲/۶ ۳) ۲/۶۷ ۴) ۲/۷۳

حل: ابتدا با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، شکل ظرف در دو حالت گفته شده را ترسیم کرده و حجم آب را برای این دو حالت به‌دست می‌آوریم.



حالت (۱)



حالت (۲)

$$W_{w_1} = W_{۱\,\text{کل}} - W_{\text{ظرف}} = ۹۰۰ - ۵۰۰ = ۴۰۰ gr \Rightarrow V_{w_1} = ۴۰۰ cm^۳$$

که چون کل حجم ظرف در این حالت با آب پر شده است، بنابراین حجم ظرف نیز برابر است با:

$$V_{\text{ظرف}} = ۴۰۰ cm^۳$$

$$W_{w_2} = W_{۲\,\text{کل}} - (W_s + W_{\text{ظرف}}) = ۱۲۷۵ - (۶۰۰ + ۵۰۰) = ۱۷۵ gr \Rightarrow V_{w_2} = ۱۷۵ cm^۳$$

حال با توجه به اینکه حجم کل ظرف را داریم، حجم دانه‌های جامد را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$V_s = V_{\text{ظرف}} - V_{w_2} = ۴۰۰ - ۱۷۵ = ۲۲۵\, cm^۳$$

و در نهایت G_s برابر است با:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} = \frac{۶۰۰}{۲۲۵ \times ۱} = ۲/۶۷$$

تمرین ۳۵: $۱۸۰\,gr$ از خاکی با رطوبت $\omega = ۲۰\%$ در قالبی به حجم $۱۰۰\,cm^۳$ ریخته شده و قالب پر می‌شود.

الف) درصد اشباع این نمونه چقدر است؟ $(G_s = ۲/۷)$

ب) چند گرم خاک دیگر به قالب اضافه کنیم و آن را بفشاریم (متراکم کنیم) تا در حالت پر بودن قالب، بدون تغییر در میزان رطوبت، درصد اشباع جدید $S_r = ۹۰\%$ شود؟

● حل:

الف) رابطهٔ ترکیبی مقابل را در نظر بگیرید:

$$\omega G_s = S_r e$$

در این رابطه ω و G_s معلوم می‌باشند و برای به‌دست آوردن S_r نیز کافیست تا e را به‌دست آوریم. بدین منظور از رابطهٔ وزن مخصوص طبیعی خاک به‌صورت زیر استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\begin{cases} \gamma_t = \dfrac{W}{V} = \dfrac{۱۸۰}{۱۰۰} = ۱/۸\, gr/cm^۳ \\ \gamma_t = \dfrac{G_s(1+\omega)\gamma_w}{1+e} = \dfrac{۲/۷ \times (۱ + ۰/۲) \times ۱}{۱ + e} = \dfrac{۲/۷ \times ۱/۲}{۱+e} \end{cases}$$

بهتر است صورت کسر را ساده نکنید!

$$\Rightarrow \frac{۲/۷ \times ۱/۲}{۱+e} = ۱/۸ \Rightarrow ۱+e = ۱/۸ \Rightarrow e = ۰/۸$$

در نهایت S_r در این حالت برابر می‌شود با:

$$۰/۲ \times ۲/۷ = S_r \times ۰/۸ \Rightarrow S_r = \frac{۲/۷}{۴} = ۰/۶۷۵ \text{ یا } ۶۷/۵\%$$

ب) توجه کنید که با اضافه و متراکم کردن خاک، درصد رطوبت تغییر نمی‌کند، بلکه نسبت تخلخل خاک (e) تغییر خواهد کرد. پس ابتدا نسبت تخلخل جدید را در درصد اشباع موردنظر $(S_r = ۹۰\%)$ می‌یابیم:

$$(\omega G_s = S_r e)_{\text{جدید}} \Rightarrow ۰/۲ \times ۲/۷ = ۰/۹ \times e \Rightarrow e = ۰/۶$$

سپس وزن مخصوص خاک را در حالت جدید محاسبه می‌کنیم:

$$\gamma_t = \frac{G_s(1+\omega)\gamma_w}{1+e} = \frac{۲/۷ \times (۱+۰/۲) \times ۱}{۱+۰/۶} = ۲/۰۲۵\, gr/cm^۳$$

بنابراین وزن خاک لازم برای پر کردن قالب در حالت فوق ($\gamma_t = ۲/۰۲۵\, gr/cm^۳$)، برابر می‌شود با:

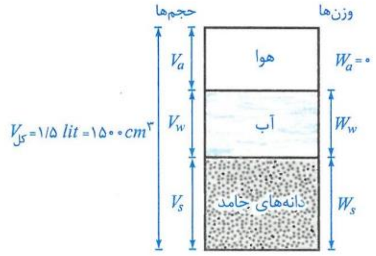
$$\gamma_t = \frac{W}{V} \Rightarrow W = \gamma_t V = ۲/۰۲۵ \times ۱۰۰ = ۲۰۲/۵\, gr$$

یعنی باید $۲۰۲/۵ - ۱۸۰ = ۲۲/۵\, gr$ خاک به خاک قبلی اضافه کنیم.

تمرین ۳۶: در یک قالب با حجم $۱/۵\, lit$، خاک با درصد رطوبت $\omega = ۱۰\%$ می‌ریزیم و قالب را پُر می‌کنیم. اگر بخواهیم درصد نهایی هوای خاک $A = ۱۰\%$ شود، در آن‌صورت چه وزنی از خاک مذکور باید درون قالب قرار بگیرد؟ $(G_s = ۲/۵)$

● حل: برای حل این سؤال که در آن هر سه فاز دانه‌های جامد، آب و هوا وجود دارند، بهتر است از دیاگرام سه فازی استفاده کنیم.

در شکل رسم شده مراحل زیر را انجام می‌دهیم:



۱- با توجه به درصد هوا می‌توان نوشت:

$$A = \frac{V_a}{V} \Rightarrow ۰/۱ = \frac{V_a}{۱۵۰۰} \Rightarrow V_a = ۱۵۰\, cm^۳$$

بنابراین مجموع حجم آب و حجم دانه‌های جامد برابر می‌شود با:

$$V_w + V_s = V - V_a = ۱۵۰۰ - ۱۵۰ = ۱۳۵۰\, cm^۳$$

۲- حجم دانه‌های جامد (V_s) برحسب وزن آن (W_s) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \Rightarrow V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{W_s}{۲/۵ \times ۱} = ۰/۴ W_s$$

۳- حجم آب (V_w) برحسب وزن آب (W_w) و سپس برحسب وزن دانه‌های جامد (W_s) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} \dfrac{W_w}{V_w} = \gamma_w = ۱ \Rightarrow V_w = W_w \\ \omega = \dfrac{W_w}{W_s} \Rightarrow W_w = \omega W_s = ۰/۱ W_s \end{cases} \Rightarrow V_w = ۰/۱ W_s$$

حال با استفاده از نتایج سه مرحلهٔ فوق، خواهیم داشت:

$$V_w + V_s = ۱۳۵۰ \Rightarrow ۰/۱W_s + ۰/۴W_s = ۱۳۵۰ \Rightarrow W_s = ۲۷۰۰\,gr \;,\; W_w = ۰/۱W_s = ۰/۱ \times ۲۷۰۰ = ۲۷۰\,gr$$

پس در نهایت وزن کل خاک لازم برای رسیدن به خواستهٔ مسئله برابر می‌شود با:

$$W_{\text{کل}} = W_s + W_w = ۲۷۰۰ + ۲۷۰ = ۲۹۷۰\,gr$$

تمرین ۳۷: برای اجرای بخشِ خاکی در یک کیلومتر از بزرگراهی به عرض ۳۰m و ضخامت ۱/۵m، خاک متراکم با نسبت تخلخل ۰/۵ لازم است. در مجاورت این بزرگراه ۴ منبع قرضه وجود دارند که می‌توانند خاک موردنیاز بزرگراه را تأمین کنند. باتوجه به جدول ارائه شده، اقتصادی‌ترین گزینه جهت اجرای این قطعه از بزرگراه را تعیین کنید. (کلیه هزینه‌ها به‌جز هزینه حمل خاک به کارگاه برای هر ۴ منبع یکسان است)

قرضه	نشانه خلأ	هزینه حمل ($\$/m^3$)
A	۱/۵	۱/۴
B	۱/۲	۱/۵
C	۱	۱/۸
D	۰/۸	۲

۱) A ۲) B
۳) C ۴) D

● برای پاسخ به این تست ابتدا رابطهٔ مقایسهٔ حجم‌ها را به‌خاطر آورید:

$$\frac{V_۲}{V_۱} = \frac{۱ + e_۲}{۱ + e_۱} \quad , \quad V_۲ = ۳۰ \times ۱/۵ \times ۱۰۰۰ = ۴۵۰۰۰\,m^۳$$

$V_۲$: حجم اجرایی
$e_۲$: نسبت تخلخل اجرایی = ۰/۵
$e_۱$: نسبت تخلخل قرضهٔ موردنظر
$V_۱$: حجم منبع قرضهٔ موردنظر

همانطورکه می‌بینید مقدار $V_۲$ معلوم است و ما باید به‌جای $V_۱$ به‌ترتیب، V_A، V_B و ... را قرار دهیم و به‌جای $e_۱$ نیز نسبت‌های تخلخلِ نظیر آنها را لحاظ می‌کنیم تا بتوانیم، حجم‌های V_A، V_B و ... را به‌دست آوردیم. سپس با داشتن هزینهٔ حمل برای هر متر مکعب از هر قرضه، هزینهٔ حمل کلی قرضه تا محل کارگاه را می‌یابیم:

$$\begin{cases} V_A = V_۲(\frac{۱+e_A}{۱+e_۲}) = ۴۵۰۰۰ \times (\frac{۱+۱/۵}{۱+۰/۵}) = ۷۵۰۰۰\,m^۳ \Rightarrow cost(A) = ۷۵۰۰۰ \times ۱/۴ = ۱۰۵۰۰۰ \text{ دلار} \\ V_B = V_۲(\frac{۱+e_B}{۱+e_۲}) = ۴۵۰۰۰ \times (\frac{۱+۱/۲}{۱+۰/۵}) = ۶۶۰۰۰\,m^۳ \Rightarrow cost(B) = ۶۶۰۰۰ \times ۱/۵ = ۹۹۰۰۰ \text{ دلار} \\ V_C = V_۲(\frac{۱+e_C}{۱+e_۲}) = ۴۵۰۰۰ \times (\frac{۱+۱}{۱+۰/۵}) = ۶۰۰۰۰\,m^۳ \Rightarrow cost(C) = ۶۰۰۰۰ \times ۱/۸ = ۱۰۸۰۰۰ \text{ دلار} \\ V_D = V_۲(\frac{۱+e_D}{۱+e_۲}) = ۴۵۰۰۰ \times (\frac{۱+۰/۸}{۱+۰/۵}) = ۵۴۰۰۰\,m^۳ \Rightarrow cost(D) = ۵۴۰۰۰ \times ۲ = ۱۰۸۰۰۰ \text{ دلار} \end{cases}$$

همانطور که ملاحظه می‌شود هزینه قرضه B از همه کمتر و اقتصادی‌تر است.

توجه: در پاسخ به این تست چون $V_۲$ و $e_۲$ ثابت هستند، می‌توانستیم فقط حاصلضرب هزینه حمل (برحسب $\$/m^۳$) در $(۱+e)$ را برای هر منبع قرضه محاسبه و باهم مقایسه نماییم و از آنجا به همین نتیجه بالا برسیم.

تمرین ۳۸: مصالح یک منبع قرضه به‌صورت دو خاک A و B با مشخصات زیر موجودند:

خاک A: $G_s = ۲/۵$، $e = ۰/۵$ و $S_r = ۰/۵$

خاک B: $G_s = ۲/۵$، $e = ۱$ و $S_r = ۱$

نسبت اختلاط خاک A با خاک B در خاک حاصل به‌ترتیب چقدر باشد تا بدون اضافه یا کم کردن آب، رطوبت مخلوط ٪۲۰ شود؟

۱) ٪۵۰ و ٪۵۰ ۲) ٪۲۵ و ٪۷۵ ۳) ٪۶۰ و ٪۴۰ ۴) ٪۴۰ و ٪۶۰

حل: ابتدا وزن مخصوص خشک و رطوبت هر کدام از قرضه‌ها را می‌یابیم:

$$\gamma_{d_A} = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+e_A} = \frac{2.5\times 1}{1+0.5} = \frac{5}{3}\ gr/cm^3$$

$$\omega G_s = S_r\, e \Rightarrow \omega_A \times 2.5 = 0.5\times 0.5 \Rightarrow \omega_A = 0.1$$

$$\gamma_{d_B} = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+e_B} = \frac{2.5\times 1}{1+1} = \frac{5}{4}\ gr/cm^3$$

$$\omega G_s = S_r\, e \Rightarrow \omega_B \times 2.5 = 1\times 1 \Rightarrow \omega_B = 0.4$$

حال در ادامه با توجه به ثابت بودن وزن دانه‌های جامد و آب در قبل و بعد از اختلاط دو خاک، می‌نویسیم:

$$W_{s_A} + W_{s_B} = W_{s\,(\text{مخلوط})} \xrightarrow{W_s = \gamma_d V} \gamma_{d_A} V_A + \gamma_{d_B} V_B = \gamma_{d\,(\text{مخلوط})} V_{(\text{مخلوط})}$$

$$\Rightarrow \frac{5}{3}\times V_A + \frac{5}{4}\times V_B = \gamma_{d(\text{مخلوط})} V_{(\text{مخلوط})} \qquad \text{رابطهٔ } (I)$$

$$W_{w_A} + W_{w_B} = W_{w\,(\text{مخلوط})} \xrightarrow[W_s = \gamma_d V]{W_w = \omega W_s} \omega_A\,\gamma_{d_A} V_A + \omega_B\,\gamma_{d_B} V_B = \omega_{(\text{مخلوط})}\,\gamma_{d\,(\text{مخلوط})} V_{(\text{مخلوط})}$$

$$\Rightarrow 0.1\times\frac{5}{3}\times V_A + 0.4\times\frac{5}{4}\times V_B = 0.2\times \gamma_{d\,(\text{مخلوط})} V_{(\text{مخلوط})} \qquad \text{رابطهٔ } (II)$$

حال با مقایسه این دو رابطه (روابط I و II) خواهیم داشت:

$$0.1\times\frac{5}{3}V_A + 0.4\times\frac{5}{4}V_B = 0.2\times\left(\frac{5}{3}\times V_A + \frac{5}{4}\times V_B\right) \Rightarrow \frac{1}{6}V_A = \frac{1}{4}V_B \Rightarrow \frac{V_A}{V_B} = \frac{6}{4} = \frac{60\%}{40\%}$$

بنابراین گزینهٔ (۳) درست است.

تمرین ۳۹: میزان رطوبت و وزن مخصوص سه خاک A و B و C مطابق جدول زیر است. به‌ترتیب چه حجمی از خاکهای A و B لازم است تا بدون تغییر در میزان رطوبت، یک مترمکعب از خاک C حاصل شود؟

مشخصات / خاک	وزن مخصوص (kN/m^3)	میزان رطوبت
A	۱۶/۵	۰/۱
B	۲۰	۰/۲۵
C	۲۱/۶	۰/۲

۱) ۰/۴ و ۰/۶
۲) ۰/۲۵ و ۰/۷۵
۳) ۰/۲۵ و ۰/۶
۴) ۰/۴ و ۰/۷۵

حل: این تست نیز تا حدودی مشابه با تمرین قبل است. از این‌رو به طریق مشابه با آن، می‌نویسیم:

$$W_{s(A)} + W_{s(B)} = W_{s(C)} \Rightarrow \gamma_{d(A)} V_A + \gamma_{d(B)} V_B = \gamma_{d(C)} V_C$$

$$\Rightarrow \left(\frac{16.5}{1+0.1}\right) V_A + \left(\frac{20}{1+0.25}\right) V_B = \left(\frac{21.6}{1+0.2}\right)\times 1 \Rightarrow 15V_A + 16V_B = 18 \qquad (I)$$

$$W_{w(A)} + W_{w(B)} = W_{w(C)} \Rightarrow \omega_A \gamma_{d(A)} V_A + \omega_B \gamma_{d(B)} V_B = \omega_C \gamma_{d(C)} V_C$$

$$\Rightarrow 0.1\times 15\times V_A + 0.25\times 16\times V_B = 0.2\times 18\times 1 \Rightarrow 1.5V_A + 4V_B = 3.6 \qquad (II)$$

با حل دستگاه ایجادشده از روابط (I) و (II)، مقادیر V_A و V_B به‌صورت مقابل به‌دست می‌آید: $V_A = 0.4\ m^3 \ ,\ V_B = 0.75\ m^3$

تمرین ۴۰: دو قرضه با مشخصات زیر موجود است:

قرضهٔ A: $e = 0.6\ ,\ S_r = \frac{7}{30} \simeq 0.233\ ,\ G_s = 2.8$ قرضهٔ B: $e = 0.8\ ,\ S_r = \frac{27}{80} \simeq 0.337\ ,\ G_s = 2.7$

می‌خواهیم با ترکیب این دو خاک، درصد رطوبت ۱۰٪ را فراهم کرده و خاک جدیدی با $\gamma_d = 16\ kN/m^3$ به‌دست آوریم. اگر بخواهیم نسبت استفاده از دو قرضهٔ A و B، به‌صورت ۲ به ۱ باشد (۲ قسمت A و ۱ قسمت B):

الف) برای هر متر مکعب خاکریز جدید، چه حجمی از خاک قرضه‌ها نیاز است؟

ب) میزان افزایش یا کاهش آب به خاک قرضه‌ها، برای رسیدن به خاک موردنظر، چند kg در هر متر مکعب است؟

● حل

الف) خاک به‌دست آمده از ترکیب دو خاک A و B را C می‌نامیم. می‌دانیم حین فرآیند تراکم، وزن دانه‌های جامد تغییر نمی‌کند، لذا می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} W_{s_A} + W_{s_B} = W_{s_C} \\ \gamma_d = \dfrac{W_s}{V} \Rightarrow W_s = \gamma_d V \end{cases} \Rightarrow (\gamma_d V)_A + (\gamma_d V)_B = (\gamma_d \underbrace{V}_{1\,m^3})_C$$

$$\gamma_{d_A} = \left(\frac{G_s \gamma_w}{1+e}\right)_A = \frac{2/8\times 10}{1+0/6} = 17/5\ kN/m^3$$

$$\gamma_{d_B} = \left(\frac{G_s \gamma_w}{1+e}\right)_B = \frac{2/7\times 10}{1+0/8} = 15\ kN/m^3$$

$$\Rightarrow 17/5\times \underbrace{V_A}_{2V_B} + 15\times V_B = 16\times 1 \Rightarrow V_B = 0/32\ m^3\ ,\ V_A = 2V_B = 0/64\ m^3$$

(طبق صورت سؤال $V_A = 2V_B$)

ب) در یک متر مکعب از خاک C با درصد رطوبت موردنظر، مقدار آب برابر است با:

$$W_{w_C} = \omega_C W_{s_C} = \omega_C V_C \gamma_{d_C} = 0/1\times 1\times 16 = 1/6\ kN$$

در ادامه می‌توان مقدار آب ناشی از اختلاط حجم‌های به‌دست آمده از خاک‌های A و B را به‌دست آورد که بدین منظور ابتدا لازم است تا درصد رطوبت این خاک‌ها را بیابیم:

خاک A : $\omega G_s = S_r e \Rightarrow \omega_A \times 2/8 = \dfrac{7}{30}\times 0/6 \Rightarrow \omega_A = 0/05$

خاک B : $\omega G_s = S_r e \Rightarrow \omega_B \times 2/7 = \dfrac{27}{80}\times 0/8 \Rightarrow \omega_B = 0/1$

مقدار آب ناشی از اختلاط خاک‌های A و B : $W_{w_A} + W_{w_B} = (\omega W_s)_A + (\omega W_s)_B = (\omega \gamma_d V)_A + (\omega \gamma_d V)_B$

$$= 0/05\times 17/5\times 0/64 + 0/1\times 15\times 0/32 = 1/04\ kN$$

پس برای رسیدن به مقدار $1/6\ kN$ آب در خاک C (که به ازای $\omega = 0/1$ حاصل شده است)، باید به مخلوط به‌دست آمده، آب اضافه کنیم که مقدار این آب اضافی برابر است با:

مقدار آب اضافی لازم برای رسیدن به خاک C $= 1/6 - 1/04 = 0/56\ kN$ (به ازاء هر متر مکعب خاک C)

تست‌های فصل اول

۱- کدام‌یک از عبارات زیر درمورد کانی‌های رسی صحیح است؟

۱) پایداری کائولینیت‌ها از ایلیت‌ها بیشتر است ولی از مونت‌موریلونیت‌ها کمتر می‌باشد.
۲) ابعاد ایلیت‌ها از مونت‌موریلونیت‌ها و کائولینیت‌ها کمتر است.
۳) تمایل به جذب آب در مونت‌موریلونیت‌ها بیشتر از کائولینیت‌ها و ایلیت‌ها می‌باشد.
۴) هرسه مورد فوق صحیح می‌باشند.

۲- در مورد خواص روانی و خمیری خاکهای ریزدانه رسی می‌توان گفت که ... عامل رفتار خمیری و ... باعث بروز خاصیت روانی خاکهای مذکور می‌شوند. (سراسری-۸۰)

۱) آب جذب سطحی، قطبی بودن مولکول آب
۲) آب جذب سطحی، آب آزاد
۳) قطبی بودن مولکول‌های آب، وجود یون‌های پتاسیم و کلسیم و سدیم
۴) جایگزینی اتم‌های با ظرفیت کمتر در مولکول‌های خاک رس، جایگزینی فلزها با ظرفیت بیشتر

۳- علت اصلی چسبندگی در خاک‌های رسی وجود بارهای ... می‌باشد. (سراسری-۸۸)

۱) الکترواسمزی ۲) الکترواستاتیکی ۳) الکترومغناطیسی ۴) هیدرواستاتیکی

۴- رطوبت یک نمونه خاک اشباع ۲۰ درصد و چگالی دانه‌های جامد آن $G_s = ۲/۵$ می‌باشد. تخلخل (پوکی) این خاک کدام است؟

۱) ۰/۵ ۲) ۰/۶۷ ۳) ۰/۳۳ ۴) ۰/۴۵

۵- اگر G_s چگالی دانه‌های جامد خاک، ω میزان رطوبت، e نشانهٔ خلاء، n پوکی و A درصد هوای خاک باشد، در آن‌صورت حاصل عبارت $A(\frac{e}{n})$ کدام است؟

۱) $e+G_s$ ۲) $e-\omega G_s$ ۳) $1+\omega G_s$ ۴) هیچکدام

۶- کدام رابطه، بین چگالی دانه‌های جامد خاک G_s، درجه اشباع S_r، نشانهٔ خلاء (ضریب تخلخل) e و درصد رطوبت ω برقرار می‌باشد؟ (سراسری - ۸۸)

۱) $\frac{G_s}{e}=\frac{\omega}{S_r}$ ۲) $\frac{G_s}{1+e}=\frac{S_r}{\omega}$ ۳) $\frac{G_s}{e}=\frac{S_r}{\omega}$ ۴) $\frac{G_s}{1+e}=\frac{\omega}{S_r}$

۷- اگر نسبت حجم فضای خالی به حجم دانه‌های جامد یک خاک برابر ۰/۸ و چگالی دانه‌های جامد و درجه اشباع خاک به‌ترتیب برابر ۲/۵ و ۰/۷۵ باشند، در آن‌صورت جرم مخصوص این خاک برحسب (gr/cm^3) چقدر است؟

۱) ۱/۵ ۲) ۱/۶۷ ۳) ۱/۷۲ ۴) ۱/۹

۸- خاکی با رطوبت ۰/۲ تا رسیدن به اشباع ۸۱ درصد، متراکم می‌شود. اگر چگالی دانه‌های جامد خاک $G_s = ۲/۷$ باشد، وزن مخصوص حالت خشک و اشباع خاک در این حالت به‌ترتیب کدامند؟ ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^3$)

۱) $۱۶/۸\ kN/m^3$, $۲۰/۲\ kN/m^3$ ۲) $۱۶/۲\ kN/m^3$, $۲۰/۲\ kN/m^3$
۳) $۱۶/۸\ kN/m^3$, $۱۹/۴\ kN/m^3$ ۴) $۱۶/۲\ kN/m^3$, $۱۹/۴\ kN/m^3$

۹- وزن مخصوص خشک خاکی ۰/۸ وزن مخصوص حالت اشباع آن است. اگر تخلخل نمونه برابر ۰/۴ باشد، در آن‌صورت وزن مخصوص خشک (γ_d) برابر است با: ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^3$)

۱) $۱۶\ kN/m^3$ ۲) $۱۸\ kN/m^3$ ۳) $۲۰\ kN/m^3$ ۴) $۲۲\ kN/m^3$

۱۰- مقداری ماسه خشک در لولهٔ استوانه‌ای شکل به مساحت $۲۰۰cm^2$ و ارتفاع $۷۵cm$ ریخته شده است. حجم آب لازم برای اشباع نمودن خاک درون استوانه $۵۰۰۰cm^3$ است. وزن مخصوص خشک ماسه چند gr/cm^3 است؟ ($\gamma_s = ۲/۷\ gr/cm^3$)

۱) ۲ ۲) ۱/۸ ۳) ۱/۶۷ ۴) ۱/۵

۱۱- وزن ۲۰۰۰ سانتی‌متر مکعب از خاکی ۴۰۰۰ گرم و وزن ۱۸۰ گرم از آن خاک بعد از خشک شدن در کوره ۱۵۰ گرم می‌شود. اگر چگالی دانه‌های جامد خاک ۲/۶۷ باشد، در این‌صورت نسبت تخلخل این خاک کدام است؟

۱) ۰/۵ ۲) ۰/۵۵ ۳) ۰/۶ ۴) ۰/۶۵

۱۲- در تست قبل، وزن مخصوص خشک خاک gr/cm^3 ... بوده و تقریباً gr ... آب، نمونه را اشباع خواهد کرد.

۱) ۱/۶۷ و ۸۳ ۲) ۱/۷۵ و ۸۳ ۳) ۱/۷۵ و ۱۳۸ ۴) ۱/۶۷ و ۱۳۸

۱۳- در یک تست نفوذپذیری، حجم نمونه اشباع $320\,cc$ و وزن خشک نمونه $540\,gr$ و چگالی دانه‌ها $G_s = 2/7$ است. تخلخل (n) این نمونه عبارت است از: (سراسری - ۷۳)

۱) ٪۳۷/۵ ۲) ٪۴۵/۵ ۳) ٪۳۵ ۴) ٪۵۵

۱۴- یک متر مکعب از خاک خشکی دارای وزن $1900\,kg$ است. به درون این خاک $300\,kg$ قلوه سنگ بزرگ با $\gamma_s = 3000\,kg/m^3$ اضافه می‌کنیم. وزن مخصوص خاک مخلوط جدید چند kg/m^3 خواهد شد؟

۱) ۲۰۲۰ ۲) ۲۲۰۰ ۳) ۲۰۰۰ ۴) ۲۴۵۰

۱۵- از خاکی با میزان رطوبت ۰/۲ و چگالی دانه‌های ۲/۶۵، نمونه‌ای به وزن ۶۰۰ گرم برداشته شده و با ۱۳/۵ گرم پارافین اندود می‌شود. سپس نمونه مذکور در ظرف مدرجی انداخته می‌شود که در این حالت ۳۱۵ سانتی‌متر مکعب، افزایش حجم به‌وجود می‌آورد. اگر وزن مخصوص پارافین $0/9\,gr/cm^3$ باشد، نسبت تخلخل خاک چقدر است؟

۱) ۰/۵ ۲) ۰/۵۹ ۳) ۰/۶۵ ۴) ۰/۶۷

۱۶- خاکریزی با ۲۰ درصد رطوبت، متراکم و وزن مخصوص مرطوب آن به $20\,kN/m^3$ رسیده است. اگر چگالی دانه‌های آن ۲/۵ باشد، درصد اشباع خاکریز را تعیین کنید. $(\gamma_w = 10\,kN/m^3)$

۱) ٪۵۸ ۲) ٪۶۷ ۳) ٪۸۵ ۴) ٪۱۰۰

۱۷- یک لایه خاک درشت‌دانه به ضخامت ۵ متر بر روی یک بستر سنگی قرار دارد. لایهٔ مورد نظر خشک بوده و وزن مخصوص آن برابر $1800\,kg/m^3$ می‌باشد. چند سانتی‌متر بارندگی در منطقه باعث اشباع شدن این لایه می‌گردد؟ از تبخیر و خروج آب از لایهٔ مذکور صرف‌نظر کنید و چگالی دانه‌های جامد خاک را برابر ۲/۷ درنظر بگیرید.

۱) ۲۵۰ ۲) ۱۶۷ ۳) ۱۵۰ ۴) ۱۳۳

۱۸- یک نمونه خاک با رطوبت ۲۰ درصد و نسبت تخلخل $\frac{2}{3}$ موجود است. اگر درصد رطوبت خاک دوبرابر شود، در آن‌صورت درجه اشباع خاک چه تغییری می‌کند؟ $(G_s = 2/5)$

۱) دوبرابر می‌شود. ۲) $\frac{3}{2}$ برابر می‌شود. ۳) $\frac{4}{3}$ برابر می‌شود. ۴) تغییری نمی‌کند.

۱۹- درجهٔ اشباع یک خاک با ثابت ماندن حجم آن، افزایشی به اندازه ۲۵ درصد مقدار اولیه داشته است، در آن‌صورت:

۱) نسبت تخلخل خاک، ۰/۸ مقدار اولیه خواهد شد.
۲) میزان رطوبت خاک، ۱/۲۵ برابر مقدار اولیه خواهد شد.
۳) نسبت تخلخل و میزان رطوبت، به‌ترتیب ۰/۸ و ۱/۲۵ برابر مقدار اولیه خواهند شد.
۴) ۰/۲۵ به میزان رطوبت خاک اضافه خواهد شد.

۲۰- یک نمونه خاک با چگالی دانه‌های جامد ۲/۵، نسبت تخلخل ۰/۵ و ۲۰ درصد رطوبت موجود است. چقدر آب به آن اضافه کنیم (برحسب گرم) تا حجم نمونه $25\,cm^3$ افزایش یابد؟

۱) ۱۲/۵ ۲) ۲۵
۳) ۵۰ ۴) اطلاعات داده شده کافی نمی‌باشد.

۲۱- وزن مخصوص خشک یک نمونه خاک، با افزایش رطوبت کم شده است. کدام اظهارنظر درمورد این خاک صحیح است؟

۱) حجم نمونه دراثر افزایش رطوبت تغییری نکرده است ولی خاک اشباع شده است.
۲) حجم نمونه دراثر افزایش رطوبت افزایش یافته است ولی خاک اشباع نشده است.
۳) حجم نمونه دراثر افزایش رطوبت تغییری نکرده است و خاک ممکن است اشباع شده باشد.
۴) حجم نمونه دراثر افزایش رطوبت افزایش یافته است و خاک اشباع شده است.

۲۲- به هنگام افزودن آب به یک نمونه خاک، ... الزاماً افزایش می‌یابد.

۱) نسبت تخلخل خاک
۲) نسبت تخلخل و چگالی دانه‌های جامد خاک
۳) میزان رطوبت خاک
۴) میزان رطوبت و درجهٔ اشباع خاک

۲۳- نمونه‌ای از رس اشباع به حجم $۱۰۵ cm^۳$ و وزن $۲۱۰ gr$ بعد از خشک شدن در کوره $۱۵ cm^۳$ کاهش حجم داده و وزنش نیز به $۱۷۵ gr$ می‌رسد. چگالی دانه‌های جامد خاک کدام است؟

۱) ۲/۵
۲) ۲/۶
۳) ۲/۶۷
۴) ۲/۷۳

۲۴- یک نمونه خاک به حجم $۱۰۰۰ cm^۳$ و وزن $۱۸۰۰ gr$ موجود است. وزن خشک این خاک $۱۵۰۰ gr$ و چگالی دانه‌های آن ۲/۶۵ تعیین گردیده است. اگر نمونه مذکور بدون کاهش حجم به میزان ۰/۱ از رطوبت خود را ازدست دهد، در آن‌صورت وزن مخصوص طبیعی آن چند $gr/cm^۳$ خواهد شد؟

۱) ۱/۸
۲) ۱/۷۵
۳) ۱/۶۵
۴) ۱/۶

۲۵- یک نمونه از خاک خشکی با مقداری آب که معادل ۲۰ درصدِ وزن خاک است، به‌طور یکنواخت مخلوط و به‌صورت یک استوانهٔ یک لیتری متراکم شده و وزن آن ۱/۸ کیلوگرم تعیین شده است. اگر چگالی دانه‌های جامد این خاک برابر ۲/۵ باشد، در آن‌صورت نسبت تخلخل استوانه یک لیتری برابر است با:

۱) ۰/۹۵
۲) ۰/۶۷
۳) ۰/۵
۴) ۰/۳۳

۲۶- قرضه‌ای با رطوبت طبیعی ۲۰ درصد و وزن مخصوص $۱۹۲۰ kg/m^۳$، جهت اجرای یک خاکریز متراکم به‌کار می‌رود. برای انتقال خاک از قرضه به محل اجرای خاکریز از کامیون‌هایی به ظرفیت $۱۲ m^۳$ استفاده می‌شود. وزن آب حمل شده توسط هر کامیون چند ton است؟

۱) ۱۹/۲
۲) ۱۲/۹
۳) ۳/۸۴
۴) ۲

۲۷- از یک منبع قرضه، خاکی با چگالی دانه‌های ۲/۷ و نشانهٔ خلاء ۰/۸ برداشته شده و جهت احداث یک خاکریز به محل کارگاه حمل می‌شود. پس از اجرای خاکریز متراکم، میزان رطوبت و وزن مخصوص خاک به‌ترتیب ۰/۲ و $۲۱/۶ kN/m^۳$ به‌دست آمده است. حجم خاک قرضهٔ لازم، جهت احداث ۱/۰ مترمکعب خاکریز متراکم چند مترمکعب است؟ ($\gamma_w = ۱۰ kN/m^۳$)

۱) ۱/۲
۲) ۱/۳۳
۳) ۰/۸۳
۴) ۰/۷۵

۲۸- خاکی در حالت طبیعی خود در منبع قرضه دارای ۲۰٪ رطوبت و وزن مخصوص $۱۸ kN/m^۳$ می‌باشد. این خاک به مکان موردنظر حمل شده و متراکم می‌گردد. وزن مخصوص خاک در حالت متراکم برابر $۲۲ kN/m^۳$ و درصد رطوبت آن ۱۰٪ می‌باشد. برای یک مترمکعب خاکریز متراکم چه حجمی از خاک طبیعی موردنیاز می‌باشد؟ (برحسب $m^۳$) (سراسری - ۸۳)

۱) ۱/۳۳
۲) ۱/۲۵
۳) ۰/۷۵
۴) ۰/۶۷

۲۹- یک کلوخه از خاک خشک با وزن $W = ۴۰۰ gr$ و حجم اولیه $V = ۲۵۰ cm^۳$ را در داخل ظرف مدرجی انداخته‌ایم و در نهایت حجم آب داخل ظرف $۱۵۰ cm^۳$ افزایش یافته است. وزن مخصوص این کلوخه را در حالت اشباع آن بیابید.

۱) $۱/۶ gr/cm^۳$
۲) $۱/۸ gr/cm^۳$
۳) $۲ gr/cm^۳$
۴) $۲/۲ gr/cm^۳$

۳۰- یک کامیون، ۴/۴ تن خاک با رطوبت ۱۰٪ را بر روی زمین تخلیه کرده است. اگر به خاک ریخته شده روی زمین $۱ m^۳$ آب اضافه کنیم، رطوبت جدید خاک چند درصد خواهد شد؟

۱) ۳۳٪
۲) ۳۴٪
۳) ۳۵٪
۴) ۳۶٪

پاسخ تست‌های فصل اول

۱- (۳)

با مراجعه به توضیحات ارائه شده در مورد این سه نوع کانی رسی که در متن درس آمده است، می‌توان گفت چون مونت موریلونیت نسبت به بقیه سطح ویژهٔ بزرگتری دارد، بنابراین تمایل به جذب آب در آن بیشتر بوده و گزینهٔ (۳) صحیح است.

طبق توضیحات ارائه شده در همان قسمت می‌توانید علت نادرست بودن عبارت‌های مطرح شده در گزینه‌های (۱) و (۲) را ببینید.

۲- (۲)

در بخش (A-۴) توضیح داده شد که عامل رفتار خمیری و نیز بروز خاصیت روانی در خاک‌های رسی، به‌ترتیب آب جذب سطحی و آب آزاد می‌باشد.

۳- (۲)

طبق سؤال (۶) که در بخش (A-۴) مطرح شد، عامل اصلی خاصیت چسبندگی در رس‌ها، وجود نیروهای جاذبهٔ الکترواستاتیکی است.

۴- (۳)

چون ω، G_s و S_r را داریم (خاک اشباع است و $S_r = 1$ می‌باشد)، بنابراین از رابطهٔ ترکیبی وزنی و حجمی استفاده کرده و به‌صورت زیر e را می‌یابیم:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow 0/2 \times 2/5 = 1 \times e \Rightarrow e = 0/5$$

حال در ادامه می‌توان تخلخل خاک (n) را به‌سادگی به‌دست آورد:

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0/5}{1+0/5} = 0/33$$

۵- (۲)

ابتدا عبارت خواسته شده را به‌صورت زیر باز می‌کنیم:

$$(\frac{e}{n})A = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_v}{V}} \times \frac{V_a}{V} = \frac{V_a}{V_s} = \frac{V_v - V_w}{V_s} = \frac{V_v}{V_s} - \frac{V_w}{V_s}$$

($V_a = V_v - V_w$ ، $\frac{V_v}{V_s} \to e$)

سپس مقدار $\frac{V_w}{V_s}$ را نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{cases} V_w = \dfrac{W_w}{\gamma_w} \\ V_s = \dfrac{W_s}{G_s \gamma_w} \end{cases} \Rightarrow \frac{V_w}{V_s} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w}}{\frac{W_s}{G_s \gamma_w}} = \frac{W_w}{W_s} G_s = \omega G_s$$

و در نهایت حاصل عبارت داده شده در صورت سؤال برابر خواهد بود با:

$$(\frac{e}{n})A = e - \omega G_s$$

راه حل کوتاهتر: در تمرین (۱۵) در متن درس، دیدیم که رابطه زیر بین A، n و S_r برقرار است:

$$A = n(1 - S_r)$$

حال با به‌کارگیری این رابطه در عبارت داده شده در صورت سؤال، خواهیم داشت:

$$(\frac{e}{n})A = \frac{e}{n} \times n(1 - S_r) = e - eS_r = e - \omega G_s$$

($\omega G_s = S_r e$)

۶- (۳)

با کمی دقت می‌توان مشاهده کرد که گزینهٔ (۳) در واقع همان رابطهٔ ترکیبی وزنی و حجمی یعنی رابطـهٔ معـروف $\omega G_s = S_r e$ مـی‌باشـد، بنابراین همین گزینه پاسخ صحیح است.

۷- (۳)

جرم مخصوص یک خاک، رابطه‌ای مشابه با وزن مخصوص آن دارد. بنابراین برای نوشتن رابطه جرم مخصوص فقط کافیست در تمام رابطه به‌جای γ (وزن مخصوص) از ρ (جرم مخصوص) استفاده شود:

$$\gamma_t = \frac{G_s(1+\omega)\gamma_w}{1+e} \xrightarrow{\text{به جای } \gamma \text{ ها، } \rho \text{ می‌گذاریم}} \rho_t = \frac{G_s(1+\omega)\rho_w}{1+e}$$

حال برای حل این تست، طبق اطلاعات صورت سؤال، می‌نویسیم:

$$\frac{V_v}{V_s} = e = ۰/۸$$

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow \omega \times ۲/۵ = ۰/۷۵ \times ۰/۸ \Rightarrow \omega = ۰/۲۴$$

و در نهایت مقدار ρ_t برابر می‌شود با:

$$\rho_t = \frac{۲/۵ \times (۱+۰/۲۴) \times ۱}{۱+۰/۸} = ۱/۷۲\ gr/cm^۳$$

۸- (۲)

ابتدا روابط وزن مخصوص‌های خشک و اشباع خاک را در نظر بگیرید:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \quad , \quad \gamma_{sat} = \frac{(G_s+e)\gamma_w}{1+e}$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید در این تست کافیست ابتدا نسبت تخلخل خاک (e) را محاسبه کنیم تا از این طریق γ_d و γ_{sat} نیز به‌دست آیند. برای محاسبهٔ e از رابطهٔ ترکیبی وزنی و حجمی استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow ۰/۲ \times ۲/۷ = ۰/۸۱ \times e \Rightarrow e = \frac{۲}{۳}$$

و در نهایت γ_d و γ_{sat} به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\gamma_d = \frac{۲/۷ \times ۱۰}{۱+\frac{۲}{۳}} = ۱۶/۲\ kN/m^۳ \quad , \quad \gamma_{sat} = \frac{(۲/۷+\frac{۲}{۳})}{۱+\frac{۲}{۳}} \times ۱۰ = ۲۰/۲\ kN/m^۳$$

۹- (۱)

طبق اطلاعات صورت سؤال، می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} n = \frac{e}{1+e} = ۰/۴ \Rightarrow ۰/۴ + ۰/۴e = e \Rightarrow e = \frac{۲}{۳} \\ \gamma_d = ۰/۸\gamma_{sat} \Rightarrow \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = ۰/۸ \times \frac{(G_s+e)\gamma_w}{1+e} \Rightarrow G_s = ۰/۸G_s + ۰/۸e \end{cases}$$

$$\Rightarrow ۰/۲G_s = ۰/۸e = ۰/۸ \times \frac{۲}{۳} \Rightarrow G_s = \frac{۸}{۳}$$

و در نهایت وزن مخصوص خشک این خاک برابر می‌شود با:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{\frac{۸}{۳} \times ۱۰}{۱+\frac{۲}{۳}} = ۱۶\ kN/m^۳$$

۱۰- (۲)

در نمونهٔ مطرح شده، حجم کل (V) برابر حجم لولهٔ استوانه‌ای است:

$$V = (AH)_{\text{استوانه}} = ۲۰۰ \times ۷۵ = ۱۵۰۰۰\ cm^۳$$

از طرفی در صورت سؤال گفته شده که $۵۰۰۰\ cm^۳$ آب برای اشباع کردن نمونه لازم است، بنابراین با توجه به خشک بودن خاک می‌توان گفت، حجم حفرات خالی در این نمونه برابر $V_v = ۵۰۰۰\ cm^۳$ بوده و در نتیجه حجم دانه‌های جامد برابر می‌شود با:

$$V_s = V - V_v = ۱۵۰۰۰ - ۵۰۰۰ = ۱۰۰۰۰\ cm^۳$$

در ادامه نسبت تخلخل این خاک (e) نیز به‌سادگی و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$e=\frac{V_v}{V_s}=\frac{۵۰۰۰}{۱۰۰۰۰}=۰/۵$$

از طرفی G_s این خاک برابر است با:

$$G_s=\frac{\gamma_s}{\gamma_w}=\frac{۲/۷}{۱}=۲/۷$$

پس در نهایت وزن مخصوص خشک خاک برابر خواهد بود با:

$$\gamma_d=\frac{G_s\,\gamma_w}{۱+e}=\frac{۲/۷\times ۱}{۱+۰/۵}=۱/۸\ gr/cm^۳$$

(۳) -۱۱

ابتدا با استفاده از اطلاعات داده شده در مورد نمونهٔ ۱۸۰ گرمی از این خاک، درصد رطوبت آن را می‌یابیم:

$$\begin{cases}W_s=\text{وزن خشک در کوره}=۱۵۰\ gr\\ W_w=W_{\text{نمونه}}-W_s=۱۸۰-۱۵۰=۳۰\ gr\end{cases}\Rightarrow\ \omega=\frac{W_w}{W_s}=\frac{۳۰}{۱۵۰}=۰/۲$$

حال وزن مخصوص خاک را طبق تعریف به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\gamma_t=\frac{W_{\text{کل}}}{V_{\text{کل}}}=\frac{۴۰۰۰}{۲۰۰۰}=۲\ gr/cm^۳$$

و در نهایت با استفاده از رابطهٔ ترکیبی وزن مخصوص طبیعی، مقدار نسبت تخلخل خاک (e) به‌دست می‌آید.

$$\gamma_t=\frac{G_s\,(۱+\omega)\,\gamma_w}{۱+e}\Rightarrow ۲=\frac{\boxed{۲/۶۷}\,(۱+۰/۲)\times ۱}{۱+e}\Rightarrow ۱+e=\frac{\frac{۸}{۳}\times ۱/۲}{۲}=۱/۶\Rightarrow e=۰/۶$$

($۲/۶۷\simeq\frac{۸}{۳}$)

(۱) -۱۲

وزن مخصوص خشک خاک به‌سادگی قابل محاسبه است:

$$\gamma_d=\frac{G_s\,\gamma_w}{۱+e}=\frac{\boxed{۲/۶۷}\times ۱}{۱+۰/۶}=\frac{\frac{۸}{۳}}{۱/۶}=\frac{۵}{۳}\simeq ۱/۶۷\ gr/cm^۳$$

($۲/۶۷\to\frac{۸}{۳}$)

برای محاسبهٔ مقدار آب لازم جهت اشباعِ $۲۰۰۰\,cm^۳$ خاک داده شده، باید توجه داشته باشیم که این آب اضافی قرار است جای هوا را در تودهٔ خاک بگیرد. به‌عبارت دیگر اگر آب کاملاً جایگزین هوا شود، نمونه اشباع خواهد شد. به‌همین علت باید حجم هوای موجود در تودهٔ خاک (V_a) را بیابیم که برای این منظور به‌ترتیب مقابل عمل می‌کنیم: $V_a+V_w=V_v\Rightarrow V_a=V_v-V_w$

- محاسبه V_v:

$$\begin{cases}V_v+V_s=۲۰۰۰\,cm^۳\\ e=\frac{V_v}{V_s}=۰/۶=\frac{۳}{۵}\Rightarrow V_s=\frac{۵}{۳}V_v\end{cases}\Rightarrow V_v+\frac{۵}{۳}V_v=۲۰۰۰\Rightarrow V_v=\frac{۲۰۰۰}{\frac{۸}{۳}}=۷۵۰\,cm^۳$$

- محاسبهٔ V_w:

$$\omega G_s=S_r\,e\Rightarrow ۰/۲\times ۲/۶۷=S_r\times ۰/۶\Rightarrow S_r=\frac{۸}{۹}$$

$$S_r=\frac{V_w}{V_v}\Rightarrow \frac{۸}{۹}=\frac{V_w}{۷۵۰}\Rightarrow V_w=\frac{۲۰۰۰}{۳}cm^۳$$

- محاسبهٔ V_a:

$$V_a=V_v-V_w=\boxed{۷۵۰}-\frac{۲۰۰۰}{۳}=\frac{۲۵۰}{۳}\simeq ۸۳\ cm^۳$$

($۷۵۰\to\frac{۲۲۵۰}{۳}$)

یعنی در $۲۰۰۰\,cm^۳$ تودهٔ خاک مذکور، حجم هوا $۸۳\,cm^۳$ است و لذا برای اشباع کردن این خاک، باید $۸۳\,cm^۳$ آب بـه آن اضـافه کنـیم تـا جای هوا را بگیرد. توجه کنید که $۸۳\ cm^۳$ آب معادل $۸۳\ gr$ آب می‌باشد. $(\gamma_w=۱\,gr/cm^۳)$

راه حل دوم: تفاوت وزن خاک در حالت اشباع و وضعیت موجود، همان وزن آب لازم برای اشباع کردن خاک است:

$$\begin{cases} \Delta W_w = W_{\text{اشباع}} - W_{\text{موجود}} = \gamma_{sat} \times V - \gamma_t \times V = (\gamma_{sat} - \gamma_t) \times V \\ \gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{2/67 + 0/6}{1 + 0/6} \times 1 = \frac{\frac{8}{3} + 0/6}{1/6} = \boxed{\frac{9/8}{4/8}} \; gr/cm^3 \;\;,\;\; \gamma_t = 2 \; gr/cm^3 \end{cases} \Rightarrow \Delta W_w = (\frac{9/8}{4/8} - 2) \times 2000 \simeq 83 \; gr$$

بهتر است کسر را ساده نکنیم!

۱۳- (۱)

ابتدا با استفاده از اطلاعات مربوط به نمونهٔ خشک شده، V_s را می‌یابیم:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \Rightarrow V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{540}{2/7 \times 1} = 200 \, cm^3$$

بنابراین حجم فضای خالی (V_v) در این خاک برابر است با:

$$\underbrace{V}_{\text{حجم نمونهٔ اشباع}} = \underbrace{V_s}_{200} + V_v = 320 \Rightarrow V_v = 320 - 200 = 120 \, cm^3$$

و در نهایت تخلخل خاک (n) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{120}{320} = \frac{3}{8} = 0/375 \quad \text{یا} \quad 37/5\%$$

۱۴- (۳)

$$\begin{cases} \gamma_d = \frac{W_s}{V} \\ W_s = W_{s_1} + W_{s_2} = V_1 \gamma_{d_1} + W_{s_2} = 1 \times 1900 + 300 = 2200 \, kg \\ V = V_1 + \boxed{V_2} = 1 + 0/1 = 1/1 \, m^3 \end{cases} \Rightarrow \gamma_d = \frac{2200}{1/1} = 2000 \, kg/m^3$$

$$V_2 = V_{s_2} = \frac{W_s}{\gamma_s} = \frac{300}{3000} = 0/1 \, m^3$$

توجه: چون خاک اضافه شده به‌صورت تکه‌های سنگ بزرگ (قلوه سنگ‌های بزرگ) است، فرض می‌کنیم حجم حفرات هیچ تغییری نکرده و فقط حجم قسمت جامد تغییر یافته است. ($V_2 = V_{s_2} + \underbrace{V_{v_2}}_{0}$)

۱۵- (۲)

حجم کل خاک و پارافین، مجموعاً $315 \, cm^3$ است. پس با محاسبهٔ حجم پارافین، می‌توان حجم خاک و از آنجا وزن مخصوص خاک را به‌دست آورد.

$$\begin{cases} V_{\text{خاک}} + V_{\text{پارافین}} = 315 \\ V_{\text{پارافین}} = \frac{W_{\text{پارافین}}}{\gamma_{\text{پارافین}}} = \frac{13/5}{0/9} = 15 \, cm^3 \end{cases} \Rightarrow V_{\text{خاک}} = 315 - 15 = 300 \, cm^3$$

$$\gamma_{\text{خاک}} = \frac{W}{V} = \frac{600}{300} = 2 \, gr/cm^3$$

حال در ادامه نسبت تخلخل خاک را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\gamma = \frac{G_s (1+\omega) \gamma_w}{1+e} \Rightarrow 2 = \frac{2/65 (1 + 0/2) \times 1}{1+e} \Rightarrow 1 + e = 1/59 \Rightarrow e = 0/59$$

۱۶- (۴)

ابتدا نسبت تخلخل این خاک متراکم شده را می‌یابیم. توجه کنید که درصد رطوبت خاک در اثر تراکم تغییر نکرده و $\omega = 0/2$ ثابت باقی می‌ماند.

$$\gamma = \frac{G_s (1+\omega) \gamma_w}{1+e} \Rightarrow 20 = \frac{2/5 (1 + 0/2) \times 10}{1+e} \Rightarrow 1 + e = 1/5 \Rightarrow e = 0/5$$

در ادامه با استفاده از رابطهٔ ترکیبی وزنی و حجمی، به‌صورت زیر درصد اشباع خاک به‌دست می‌آید:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow 0/2 \times 2/5 = S_r \times 0/5 \Rightarrow S_r = 1 \quad \text{یا} \quad 100\%$$

۱۷- (۲)

ابتدا به‌صورت زیر مقدار e و سپس n را می‌یابیم:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \Rightarrow 1800 = \frac{2/7 \times 1000}{1+e} \Rightarrow e = 0/5$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0/5}{1+0/5} = \frac{1}{3}$$

حال با توجه به تعریف n خواهیم داشت:

$$n = \frac{V_v}{V} \xrightarrow{\text{منطقه در یک سطح وسیع اشباع می‌شود}} n = \frac{H_v}{H} \Rightarrow \frac{1}{3} = \frac{H_v}{5} \Rightarrow H_v = \frac{5}{3} m = 167\, cm$$

چون خاک قبل از بارندگی خشک بوده است، بنابراین کل فضای خالی آن از آب باران پر می‌شود و H_v عملاً ارتفاع بارندگی خواهد بود.

۱۸- (۳)

ابتدا درجهٔ اشباع اولیهٔ خاک را می‌یابیم:

$$\omega_1 G_s = S_{r_1} e \Rightarrow 0/2 \times 2/5 = S_{r_1} \times \frac{2}{3} \Rightarrow S_{r_1} = 0/75$$

از طرفی درصد رطوبتی که به‌ازاء آن، خاک اشباع می‌شود به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\omega_{sat} G_s = S_r e \Rightarrow \omega_{sat} \times 2/5 = 1 \times \frac{2}{3} \Rightarrow \omega_{sat} = 0/26 \text{ یا } 26\%$$

حالت اشباع ← $S_r = 1$

پس واضح است که با دو برابر شدن درصد رطوبت $(\omega_2 = 2\omega_1 = 0/4)$ چون $\omega_2 > \omega_{sat}$ می‌شود، خاک به حالت فوق اشباع رسیده و $S_{r_2} = 1$ خواهد شد. در نتیجه درجهٔ اشباع در مقایسه با حالت اول، به نسبت زیر افزایش می‌یابد:

$$\frac{S_{r_2}}{S_{r_1}} = \frac{1}{0/75} = \frac{4}{3} \Rightarrow$$ S_r، $\frac{4}{3}$ برابر می‌شود.

۱۹- (۲)

چون حجم خاک ثابت باقی مانده است، بنابراین نسبت تخلخل آن نیز تغییر نخواهد کرد. و گزینه‌های (۱) و (۳) غلط هستند.

حالا رابطهٔ ترکیبی وزنی و حجمی را در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\begin{cases} \omega G_s = S_r e \xrightarrow[\text{ثابت هستند}]{e\,,\,G_s} \dfrac{\omega_2}{\omega_1} = \dfrac{S_{r_2}}{S_{r_1}} \\ S_{r_2} = S_{r_1} + \Delta S_r = S_{r_1} + 0/25 S_{r_1} = 1/25 S_{r_1} \end{cases} \Rightarrow \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1/25 S_{r_1}}{S_{r_1}} = 1/25 \Rightarrow \omega_2 = 1/25\, \omega_1$$

توجه کنید که گزینهٔ (۴) نیز غلط است. این گزینه زمانی درست بود که در آن قید می‌شد «۰/۲۵ برابر رطوبت اولیه، به میزان رطوبت خاک اضافه خواهد شد.»

۲۰- (۲)

ابتدا با نوشتن رابطهٔ ترکیبی وزنی و حجمی، درصد اشباع خاک را می‌یابیم:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow 0/2 \times 2/5 = S_r \times 0/5 \Rightarrow S_r = 1 \text{ یا } 100\% \Rightarrow$$ خاک اشباع است

در چنین شرایطی هر چه آب اضافه کنیم، به همان میزان حجم خاک افزایش خواهد یافت. پس برای $25\, cm^3$ افزایش حجم خاک، لازم است تا $25\, cm^3$ یا معادل وزنی آن $25\, gr$ آب به خاک اضافه شود.

۲۱- (۴)

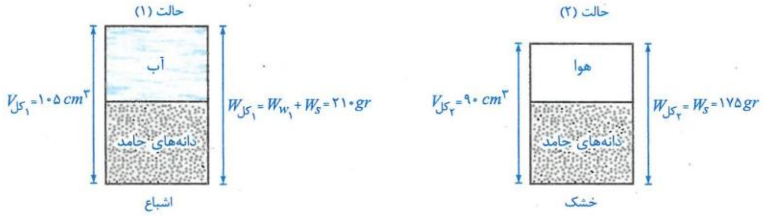
با توجه به رابطهٔ $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$، هنگامی وزن مخصوص خشک خاک کاهش می‌یابد که حجم آن (V) افزایش یافته باشد. از طرفی می‌دانیم افزایش حجم خاک در شرایط فوق اشباع اتفاق می‌افتد. پس می‌توان نتیجه گرفت که در این مسئله، در اثر افزایش رطوبت، حجم نمونه افزایش یافته و قطعاً خاک اشباع (فوق اشباع) شده است.

۲۲- (۳)

در اثر افزودن آب به خاک، درصد رطوبت آن قطعاً افزایش می‌یابد، ولی اگر خاک اشباع باشد، درجهٔ اشباع تغییر نخواهد کرد و برابر مقدار ثابت $S_r = ۱$ است. لازم به ذکر است که چگالی دانه‌های جامد خاک به میزان آب موجود در خاک بستگی نداشته و مقداری ثابت است. نسبت تخلخل خاک نیز قبل از اشباع شدن آن، با افزایش رطوبت تغییر نمی‌کند (زیرا حجم ثابت است) ولی بعد از اشباع شدن خاک، با افزایش رطوبت، V_v و از آنجا e نیز افزایش خواهند یافت. پس می‌توان گفت با افزایش مقدار آب در خاک، درصد رطوبت (ω) قطعاً افزایش می‌یابد، نسبت تخلخل (e) و درجهٔ اشباع (S_r) در برخی شرایط ثابت باقی‌مانده و در برخی شرایط دیگر افزایش می‌یابند و چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک (G_s) نیز قطعاً ثابت باقی می‌ماند.

۲۳- (۱)

دیاگرام‌های سه فازی این خاک را در دو حالت (حالت اشباع اولیه و پس از خشک شدن در کوره) در نظر بگیرید. توجه کنید که چون حجم نمونه در اثر خشک شدن کاهش پیدا کرده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خاک در حالت اولیه، قطعاً در شرایط فوق اشباع قرار داشته است.



حال با استفاده از اطلاعات داده شده در صورت سؤال می‌نویسیم:

$$W_{کل_۱}-W_{کل_۲}=(W_{w_۱}+W_s)-(W_s)=W_{w_۱} \Rightarrow W_{w_۱}=۲۱۰-۱۷۵=۳۵\,gr$$

$$\Rightarrow V_{w_۱}=\frac{W_{w_۱}}{\gamma_w}=\frac{۳۵}{۱}=۳۵\,cm^۳ \Rightarrow V_s=V_{کل_۱}-V_{w_۱}=۱۰۵-۳۵=۷۰\,cm^۳$$

و در نهایت چگالی دانه‌های جامد خاک برابر می‌شود با:

$$G_s=\frac{W_s}{V_s\,\gamma_w}=\frac{۱۷۵}{۷۰\times ۱}=۲/۵$$

۲۴- (۳)

ابتدا رطوبت اولیهٔ خاک را می‌یابیم:

$$W_۱=W_s(۱+\omega_۱) \Rightarrow ۱۸۰۰=۱۵۰۰\times(۱+\omega_۱) \Rightarrow \omega_۱=۰/۲$$

در حالت دوم خاک ۰/۱ از رطوبت خود را از دست داده است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\omega_۲=\omega_۱-\Delta\omega=۰/۲-۰/۱=۰/۱$$

و در نهایت با محاسبهٔ $\gamma_۱$ و سپس به‌کارگیری رابطهٔ زیر، $\gamma_۲$ را به‌دست می‌آوریم:

$$\gamma_۱=\frac{W}{V}=\frac{۱۸۰۰}{۱۰۰۰}=۱/۸\,gr/cm^۳$$

$$\frac{\gamma_۱}{۱+\omega_۱}=\frac{\gamma_۲}{۱+\omega_۲} \Rightarrow \frac{۱/۸}{۱+۰/۲}=\frac{\gamma_۲}{۱+۰/۱} \Rightarrow \gamma_۲=۱/۶۵\,gr/cm^۳$$

۲۵- (۲)

$$\gamma_t=\frac{W}{V}=\frac{۱/۸\times ۱۰^۳}{۱\times ۱۰^۳}=۱/۸\,gr/cm^۳$$

(تبدیل kg به gr ؛ تبدیل lit به $cm^۳$)

$$\begin{cases}\gamma_t=\dfrac{G_s(۱+\omega)\gamma_w}{۱+e}\\[2mm] \omega=\dfrac{W_w}{W_s}\ ,\ W_w=۰/۲\,W_{خاک\ خشک}=۰/۲\,W_s \Rightarrow \omega=\dfrac{۰/۲\,W_s}{W_s}=۰/۲\end{cases}$$

$$\Rightarrow ۱/۸=\frac{۲/۵\times(۱+۰/۲)\times ۱}{۱+e} \Rightarrow ۱+e=۱/۶۷ \Rightarrow e=۰/۶۷$$

۲۶- (۳)

ابتدا وزن $۱۲\ m^۳$ از خاک قرضه را می‌یابیم:

$$\gamma=\frac{W}{V}\Rightarrow ۱۹۲۰=\frac{W}{۱۲}\Rightarrow W=۲۳۰۴۰\ kg\simeq ۲۳\ ton$$

حال به‌ازاء رطوبت $\omega=۰/۲$، سهم وزن آب را از وزن به‌دست آمده در بالا تعیین می‌کنیم:

$$\omega=\frac{W_w}{W_s}\Rightarrow W_s=\frac{W_w}{\omega}=\frac{W_w}{۰/۲}=۵\,W_w$$

$$W_{\text{کل}}=W_s+W_w\Rightarrow ۲۳=۵\,W_w+W_w=۶\,W_w\Rightarrow W_w\simeq ۳/۸۴\ ton$$

به‌عبارتی می‌توان پاسخ به‌دست آمده را اینطور تفسیر کرد که هر کامیون به اندازه $۱۲\ m^۳$ خاک (معادل با $۲۳\ ton$ خاک) حمل می‌کند که $۳/۸۴\ ton$ آن را آب تشکیل می‌دهد.

۲۷- (۱)

$$\gamma_d=\frac{W_s}{V}\Rightarrow W_s=\gamma_d V$$

می‌دانیم در حین عملیات تراکم خاک، W_s ثابت است، پس می‌توان نوشت:

$$W_{s\,\text{خاک قرضه}}=W_{s\,\text{خاک اجرایی}}\Rightarrow \gamma_{d_۱}V_۱=\gamma_{d_۲}V_۲$$

($\gamma_{d_۱}V_۱$ ← قرضه، $\gamma_{d_۲}V_۲$ ← اجرایی)

$$\gamma_{d_۱}=\frac{G_s\,\gamma_w}{۱+e_۱}=\frac{۲/۷\times ۱۰}{۱+۰/۸}=۱۵\ kN/m^۳$$

$$\gamma_{d_۲}=\frac{\gamma_{t_۲}}{۱+\omega_۲}=\frac{۲۱/۶}{۱+۰/۲}=۱۸\ kN/m^۳$$

بنابراین به‌ازای $V_۲=V_{\text{اجرایی}}=۱\ m^۳$، حجم لازم از قرضه ($V_۱$) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$۱۵\times V_۱=۱۸\times ۱\Rightarrow V_۱=۱/۲\ m^۳$$

۲۸- (۱)

حل این تست مشابه سؤال قبل است، بنابراین می‌نویسیم:

$$\gamma_{d_۱}V_۱=\gamma_{d_۲}V_۲$$

($\gamma_{d_۱}V_۱$ ← قرضه، $\gamma_{d_۲}V_۲$ ← اجرایی، $V_۲$ ← $۱\ m^۳$)

$$\begin{cases}\gamma_{d_۱}=\dfrac{\gamma_{t_۱}}{۱+\omega_۱}=\dfrac{۱۸}{۱+۰/۲}=۱۵\ kN/m^۳\\[2mm] \gamma_{d_۲}=\dfrac{\gamma_{t_۲}}{۱+\omega_۲}=\dfrac{۲۲}{۱+۰/۱}=۲۰\ kN/m^۳\end{cases}\Rightarrow ۱۵\times V_۱=۲۰\times ۱\Rightarrow V_۱=۱/۳۳\ m^۳$$

۲۹- (۳)

حجم آب جابه‌جا شده در داخل ظرف مدرج، بیانگر حجم دانه‌های جامد خاک (یعنی همان V_s) است، بنابراین می‌توان گفت:

$$V_s=۱۵۰\ cm^۳\Rightarrow V_v=V-V_s=۲۵۰-۱۵۰=۱۰۰\ cm^۳$$

بنابراین وزن مخصوص این خاک در حالت اشباع به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases}\gamma_{sat}=\dfrac{W}{V}=\dfrac{W_{w\,\text{اشباع}}+W_s}{V}\\[2mm] W_{w\,\text{اشباع}}=V_v\,\gamma_w=۱۰۰\times ۱=۱۰۰\ gr\\[2mm] W_s=W_{\text{اولیه}}=۴۰۰\ gr\end{cases}\Rightarrow \gamma_{sat}=\frac{۱۰۰+۴۰۰}{۲۵۰}=۲\ gr/cm^۳$$

(V_v ← تمام حجم حفرات توسط آب پر می‌شود.)

۳۰- (۳)

مقدار رطوبت جدید خاک برابر است با:

(معادل $1ton$) $1m^3$

$$\omega_{\text{جدید}} = \frac{W_{w_{\text{جدید}}}}{W_s} = \frac{W_{w_{\text{اولیه}}} + W_{w_{\text{اضافه شده}}}}{W_s}$$

حال برای محاسبهٔ $W_{w_{\text{اولیه}}}$ و W_s به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\begin{cases} \omega = \dfrac{W_{w_{\text{اولیه}}}}{W_s} \Rightarrow \dfrac{W_{w_{\text{اولیه}}}}{W_s} = ۰/۱ \Rightarrow W_{w_{\text{اولیه}}} = ۰/۱ W_s \\ W_w + W_s = ۴/۴ \end{cases}$$

$$\Rightarrow ۰/۱ W_s + W_s = ۴/۴ \Rightarrow W_s = ۴\,ton \quad , \quad W_{w_{\text{اولیه}}} = ۰/۱ \times ۴ = ۰/۴\,ton$$

و در نهایت مقدار رطوبت جدید خاک را به‌صورت زیر تعیین می‌کنیم:

$$\omega_{\text{جدید}} = \frac{۰/۴ + ۱}{۴} = ۰/۳۵ \text{ یا } ۳۵\,\%$$

فصل ۲: شـــناخت و نام‌گـــذاری خاک‌ها

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

در فصـــل قبل بـــا نحوهٔ پیدایش خاک‌ها، انواع کانی‌های تشـــکیل‌دهندهٔ آنها و علت جذب آب توســـط رس آشـــنا شدیم و روابط وزنی و حجمی در خاک‌ها را یاد گرفتیم. در ادامهٔ بحث خود، در این فصل می‌خواهیم خاک‌ها را بهتر شناخته و سپس آنها را طبقه‌بندی و نام‌گذاری کنیم.

اصولاً شـــناخت و طبقه‌بندی خاک‌ها، براســـاس اندازه ذرات خاک و همچنین رفتار آنها در هنگام مواجه شـــدن با آب ســـنجیده می‌شـــود. بر همین اساس، در مکانیک خاک، شـــن، ماسه، لای و رس از هم تفکیک شده و در نهایت خاک‌ها طبقه‌بندی و نام‌گذاری می‌شوند.

برای شـــناخت خاک براســـاس اندازهٔ ذرات آن، از آزمایش‌هـــای دانه‌بندی با الک و هیدرومتـــری اســـتفاده می‌کنیم که انجام این آزمایش‌ها در نهایت منجر به ترســـیم نموداری به‌نام منحنی دانه‌بندی می‌شـــود. از سوی دیگر برای شناخت رفتار خاک به هنگام مواجه شدن با آب نیز از پارامترهایی به نام حدود اتربرگ (شامل حد انقباض، حد خمیری و حد روانی) استفاده می‌کنیم. ما در این فصل مباحث مطرح شده در بالا را در قالب قسمت‌های زیر شرح خواهیم داد:

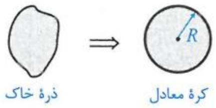
شناخت و نام‌گذاری خاک‌ها

- قسمت اول: دانه‌بندی خاک‌ها
- قسمت دوم: آشنایی با حدود اتربرگ
- قسمت سوم: نام‌گذاری خاک‌ها
- قسمت چهارم: مباحث تکمیلی شناخت و نام‌گذاری خاک‌ها

A-۱- آشنایی با آزمایش‌های مربوط به دانه‌بندی خاک

در مکانیک خاک ذراتی که قطر آنها بین ۰/۰۰۱ تا ۷۵ میلی‌متر است را خاک می‌گویند. این در حالی است که به ذرات بزرگ‌تر از ۷۵ میلی‌متر، سنگ و به ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۱ میلی‌متر، کلوئید گفته می‌شود.

حتماً از خود می‌پرسید که مگر تمام دانه‌های موجود در خاک کروی هستند که ما برای آنها قطر تعیین می‌کنیم؟ در پاسخ باید بگوییم که منظور از قطر ذرات خاک، قطر کرهٔ هم حجم با ذره بوده و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:



$$V = \frac{۴}{۳}\pi R^{۳} \xrightarrow{\text{به‌دست می‌آید } R} d_e = ۲R$$

(V: حجم ذرهٔ خاک؛ $\frac{۴}{۳}\pi R^{۳}$: حجم کرهٔ معادل؛ d_e: قطر معادل ذرهٔ خاک)

در ادامه به چند تذکر زیر توجه کنید:

۱) همانطورکه در فصل اول نیز یاد گرفتیم، ذرات خاک به دو دستهٔ درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم می‌شوند که در مقایسه قطر آنها می‌توان گفت:

- ذرات خاک
  - ۱- درشت‌دانه
    - ۱- شن ⇐ $d > ۴/۷۵\ mm$
    - ۲- ماسه ⇐ $۰/۰۷۵\ mm < d < ۴/۷۵\ mm$
  - ۲- ریزدانه
    - ۳- لای (سیلت) ⇐ $۰/۰۰۲\ mm < d < ۰/۰۷۵\ mm$
    - ۴- رس ⇐ $d < ۰/۰۰۲\ mm$

۲) با توجه به اندازه‌هایی که برای محدودهٔ قطر ذرات خاک مطرح گردید، می‌توان گفت:

الف) مرز جدایی شن و ماسه، قطر $۴/۷۵\ mm$ است.

ب) مرز جدایی درشت‌دانه و ریزدانه، قطر $۰/۰۷۵\ mm$ است.

ج) مرز جدایی لای و رس، قطر $۰/۰۰۲\ mm$ (۲ میکرون) است.

لازم به ذکر است که برای تشخیص لای و رس از یکدیگر، می‌توان علاوه بر قطر $۰/۰۰۲\ mm$، از رفتار خاک در برابر رطوبت (خواص خمیری خاک) نیز کمک گرفت که در ادامهٔ این فصل، در مورد این موضوع به‌طور مفصل صحبت خواهیم کرد.

۳) به‌طور کلی در مهندسی عمران برای قضاوت در مورد یک خاک باید درصد محدوده‌های مختلف قطری آن را بدانیم. به‌عنوان مثال مهم است که بدانیم چند درصد از وزن دانه‌های جامد، قطری بزرگ‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر دارند (چقدر درشت‌دانه داریم) و یا مثلاً چند درصد از بخش ریزدانهٔ خاک قطرشان بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۷۵ میلی‌متر است (چقدر لای داریم).

۴) برای تعیین درصد محدوده‌های قطری مختلف در یک خاک، لازم است تا آزمایش‌های دانه‌بندی با الک و هیدرومتری انجام شوند و نتیجهٔ این دو آزمایش، به‌صورت نموداری که **منحنی دانه‌بندی** نامیده می‌شود، ترسیم* گردد.

در ادامه شما را با روند کلی انجام آزمایش دانه‌بندی با الک آشنا کرده و توضیحات مربوط به آزمایش هیدرومتری را در بخش تکمیلی بیان خواهیم کرد. در انتهای این قسمت نیز به بحث در مورد منحنی دانه‌بندی می‌پردازیم.

---

* اصولاً در مکانیک خاک به‌هنگام انجام یک آزمایش، مراحل زیر اجرا می‌شود:
۱- ابتدا اعداد و ارقام و اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش ثبت می‌شود، ۲- سپس ارقام ثبت شده در قالب نمودار ترسیم می‌شود و ۳- در نهایت نمودار تفسیر شده و به اطلاعات ما در مورد خاک اضافه می‌کند.

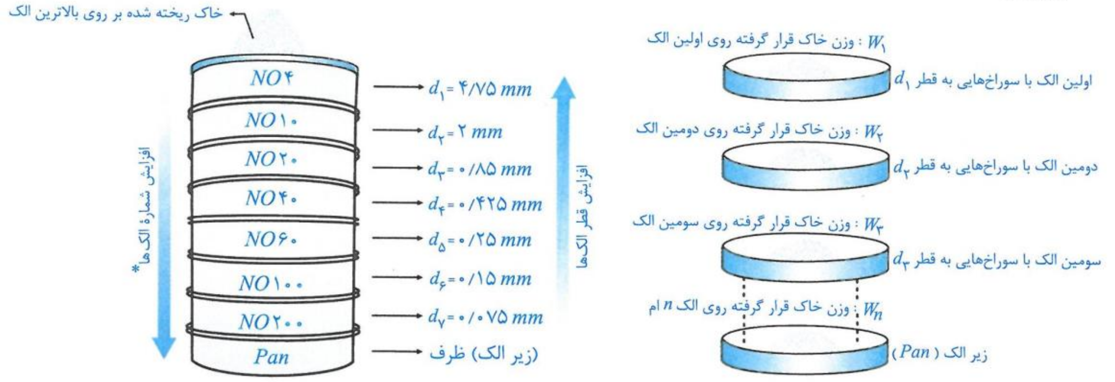
قسمت اول: دانه‌بندی خاک‌ها

زیر شاخه‌های قسمت اول

- **A-۱- آشنایی با آزمایش‌های مربوط به دانه‌بندی خاک**
- **A-۲- آشنایی با منحنی دانه‌بندی خاک**
- **A-۳- پارامترهای منحنی دانه‌بندی**

روند کلی انجام آزمایش دانه‌بندی با الک

در آزمایش دانه‌بندی با الک، ابتدا الک‌های استانداردی را مطابق شکل زیر بر روی هم قرار داده و خاک خشک شده در کوره (گرمخانه یا آوِن) را بر روی بالاترین الک می‌ریزیم (به قطر الک‌ها توجه کنید). در ادامه این الک‌ها را بر روی دستگاه لرزاننده قرار داده و پس از آنکه خوب تکان خوردند و عبور ذرات خاک از بین سوراخ‌های الک‌ها را مشاهده کردیم، لرزش الک‌ها را متوقف کرده و وزن مانده روی هر الک را به‌دست می‌آوریم.



در مورد این آزمایش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) اگر بخواهیم وزن خاک عبوری از اولین الک را به‌دست آوریم، کافی است وزن خاک‌های قرار گرفته روی دومین الک، سومین الک و ... ، که بعد از الک اول قرار دارند را با هم جمع کنیم:

$$\text{وزن خاک عبوری از اولین الک} = W_۲+W_۳+\dots+W_n$$

دقت شود که ذرات خاکی که از اولین الک عبور کرده‌اند، عملاً قطری کمتر از $d_۱$ دارند.

۲) اگر بخواهیم بدانیم که چند درصد از دانه‌های خاک قطری کمتر از $d_۱$ دارند (به زبان ساده‌تر یعنی چند درصد خاک از اولین الک عبور می‌کند)، کافی است وزن خاک عبوری از اولین الک را بر وزن کل خاک تقسیم کرده و حاصل را در عدد ۱۰۰ ضرب نماییم:

$$\text{درصد عبوری از اولین الک} = \frac{\text{وزن خاک عبوری از اولین الک}}{\text{وزن کل خاک}}\times ۱۰۰ = \frac{W_۲+W_۳+\dots+W_n}{W_{\text{کل}}}\times ۱۰۰$$

معمولاً درصد عبوری از هر الک را با نماد F_i نمایش می‌دهند که i نشان‌دهندهٔ شمارهٔ الک می‌باشد. به‌عنوان مثال درصد عبوری از الک شمارهٔ ۴ ($NO۴$) را با $F_۴$ نمایش می‌دهیم. (پس F_i را بخوانید درصد عبوری از الک NOi)

۳) مشابه با الک اول، می‌توان برای هر الک دلخواه دیگر نیز از مفهوم فوق استفاده کرده و به‌عنوان یک رابطهٔ ساده، درصد وزنی عبوری از الک i ام را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$F_i = \frac{NOi \text{ وزن خاک‌های عبوری از الک}}{\text{وزن کل خاک}}\times ۱۰۰ = \frac{W_{i+۱}+W_{i+۲}+\dots+W_{i+n}}{W_{\text{کل}}}\times ۱۰۰$$

دقت کنید که F_i در ترسیم منحنی دانه‌بندی کاربرد زیادی دارد.

در ادامهٔ بحث با بررسی چند سؤال ساده، می‌خواهیم به شما یاد بدهیم که چگونه با کمک نتایج آزمایش دانه‌بندی، می‌توان درصد شن، ماسه و ریزدانه در خاک را به‌دست آورد.

---

* شمارهٔ هر الک نشان‌دهندهٔ تعداد چشمه‌هایی (سوراخ‌هایی) است که در یک اینچ طول ($۲۵/۴ \ mm$) از شبکهٔ الک وجود دارد. به‌عنوان مثال برای تعیین بعد چشمهٔ الک شمارهٔ ۴ ($NO۴$)، داریم:

$$d = \frac{\text{یک اینچ}}{\text{تعداد چشمه‌ها}} - \text{تعداد سیم‌های الک در یک اینچ} \times \text{ضخامت هر سیم} = \frac{۲۵/۴}{۴} - ۴\times ۰/۴ = ۴/۷۵ \ mm$$

بررسی چند سوال

سؤال ۱: با توجه به وزن خاک‌های مانده بر روی الک‌ها، درصد وزنی ریزدانهٔ موجود در خاک را چگونه محاسبه می‌کنیم؟

پاسخ: همانطورکه گفتیم، مرز جدایی بین ریزدانه و درشت‌دانه، قطر $۰/۰۷۵\ mm$ است که معادل با الک شمارهٔ ۲۰۰ (NO ۲۰۰) می‌باشد. با توجه به این موضوع وزن عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ را می‌توان معادل با وزن ریزدانهٔ خاک دانست و به‌همین ترتیب درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰، معادل با درصد وزنی ریزدانهٔ خاک است، یعنی:

$F_{۲۰۰} =$ درصد وزنی خاک عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ = درصد وزنی ریزدانهٔ موجود در خاک

سؤال ۲: با توجه به وزن خاک مانده روی الک‌ها، درصد وزنی شن موجود در خاک را چگونه می‌توان به دست آورد؟

پاسخ: همانطورکه گفتیم، مرز جدایی بین شن و ماسه، قطر $۴/۷۵\ mm$ است که معادل با الک شمارهٔ ۴ (NO ۴) می‌باشد. با توجه به این موضوع می‌توان دانه‌های خاک مانده روی الک شمارهٔ ۴ (و بالاتر از آن در صورت وجود) را شن دانست. بیایید با یک مثال عددی این مطلب را بهتر درک کنیم. فرض کنیم در یک تودهٔ خاک در آزمایش دانه‌بندی، درصد عبوری از الک $NO۴$ برابر ۴۰٪ باشد (یعنی ۴۰٪ خاک از الک $NO۴$ عبور کرده باشد). پس ۶۰٪ این خاک از الک $NO۴$ عبور نکرده است و همین ۶۰٪، درصد وزنی شن در تودهٔ خاک می‌باشد. با این مثال عددی ساده می‌توان نتیجه گرفت:

$۱۰۰٪ - F_۴ =$ درصد وزنی خاک عبوری از الک $NO۴$ − ۱۰۰٪ = درصد وزنی شن موجود در خاک

سؤال ۳: با توجه به وزن خاک مانده بر روی الک‌ها، درصد وزنی ماسهٔ موجود در خاک را چگونه محاسبه می‌کنیم؟

پاسخ: می‌دانیم کل خاک شامل ذرات درشت‌دانه و ریزدانه است و در ضمن درشت‌دانه‌ها نیز خود شامل شن و ماسه هستند، بنابراین می‌توان نوشت:

۱۰۰٪ = درصد ریزدانه + درصد شن + درصد ماسه = درصد ریزدانه + درصد درشت‌دانه

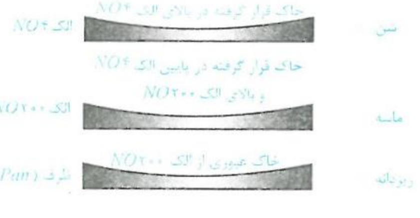
حال می‌توانیم با کمک اطلاعات به‌دست آمده از دو سؤال قبلی، درصد ریزدانه و شن را بر حسب درصد عبوری از الک‌های شمارهٔ ۲۰۰ و ۴، در رابطهٔ بالا جایگزین کنیم:

درصد ماسه = ۱۰۰ − درصد شن − درصد ریزدانه $\xrightarrow{\text{پس از ساده کردن}}$ $F_۴ - F_{۲۰۰} =$ درصد وزنی ماسهٔ موجود در خاک

به زبان ساده‌تر برای محاسبهٔ درصد وزنی ذرات ماسه که قطری بین $۴/۷۵\ mm$ (الک شمارهٔ ۴) و $۰/۰۷۵\ mm$ (الک شمارهٔ ۲۰۰) دارند، باید $F_۴$ و $F_{۲۰۰}$ را از هم کم کرد.

تذکر: پیشنهاد می‌کنیم که برای ساده‌تر شدن محاسبات درصد وزنی شن، ماسه و ریزدانه در آزمایش دانه‌بندی با الک، از شکل شماتیک زیر استفاده کنید که فقط در آن، الک‌های مرزی (یعنی الک‌های $NO۴$ و $NO۲۰۰$) نمایش داده شده‌اند. سپس با توجه به اطلاعات سؤال (برحسب اینکه چه وزن‌ها و یا چه درصدهایی داده شده‌اند)، سه قسمت مشخص شده در شکل را به‌ترتیب زیر کامل کنید:

- ابتدا درصد (یا وزن) ریزدانه را بیابید.
- سپس درصد (یا وزن) شن را محاسبه کنید.
- در نهایت درصد (یا وزن) ماسه را به‌دست آورید.



در ادامه با حل یک تمرین، مفاهیم مطرح شده در این قسمت را با هم مرور می‌کنیم.

تمرین ۱: یک نمونه خاک به وزن ۱۵۰۰ گرم و رطوبت ٪۲۰ موجود است. این نمونه پس از خشک شدن در کوره، تحت آزمایش دانه‌بندی با الک قرار می‌گیرد و درصد مانده در بالای الک ۲۰۰ NO برابر ٪۸۰ و درصد عبوری از الک ۴ NO برابر ٪۵۰ به‌دست می‌آید. مقدار ریزدانه، شن و ماسه در این خاک چند گرم است؟

حل: ابتدا بایستی وزن خشک خاک یا همان وزن دانه‌ها را به‌دست آوریم. بنابراین با توجه به مطالب خوانده شده در فصل قبل می‌نویسیم:

$$W_{\text{کل}} = (1+\omega)\,W_s \;\Rightarrow\; ۱۵۰۰ = (۱ + ۰/۲) \times W_s \;\Rightarrow\; W_s = ۱۲۵۰\ gr$$

در ادامه با توجه به اطلاعات صورت سؤال، درصد و مقدار وزنی ریزدانه، شن و ماسه را می‌یابیم:

درصد ریزدانه: درصد ریزدانه در خاک برابر است با درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ که در این خاک چون درصد بالای الک ۲۰۰ NO برابر ٪۸۰ است، بنابراین درصد عبوری از این الک برابر ۲۰ درصد (۲۰ = ۸۰ − ۱۰۰) خواهد بود و وزن ریزدانهٔ این خاک نیز برابر است با:

$$F_{۲۰۰} = \frac{\text{وزن ریزدانهٔ خاک}}{\text{وزن خشک کل خاک}} \times ۱۰۰ \;\Rightarrow\; ۲۰ = \frac{\text{وزن ریزدانهٔ خاک}}{۱۲۵۰} \times ۱۰۰ \;\Rightarrow\; \text{وزن ریزدانهٔ خاک} = ۲۵۰\ gr$$

درصد شن: طبق توضیحات متن درس، درصد شن خاک به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{درصد شن در خاک} = ۱۰۰ - F_۴ = ۱۰۰ - ۵۰ = ۵۰\%$$

حال می‌توان وزن شن موجود در این خاک را به‌دست آورد:

$$\text{درصد شن در خاک} = \frac{\text{وزن شن خاک}}{\text{وزن خشک کل خاک}} \times ۱۰۰ \;\Rightarrow\; ۵۰ = \frac{\text{وزن شن خاک}}{۱۲۵۰} \times ۱۰۰ \;\Rightarrow\; \text{وزن شن خاک} = ۶۲۵\ gr$$

درصد ماسه: برای محاسبهٔ وزن ماسه، ابتدا درصد وزنی ماسهٔ خاک را به‌دست می‌آوریم:

$$\text{درصد ماسه در خاک} = F_۴ - F_{۲۰۰} = ۵۰ - ۲۰ = ۳۰\%$$

بنابراین وزن ماسهٔ خاک برابر می‌شود با:

$$\text{درصد ماسه در خاک} = \frac{\text{وزن ماسهٔ خاک}}{\text{وزن خشک کل خاک}} \times ۱۰۰ \;\Rightarrow\; ۳۰ = \frac{\text{وزن ماسهٔ خاک}}{۱۲۵۰} \times ۱۰۰ \;\Rightarrow\; \text{وزن ماسهٔ خاک} = ۳۷۵\ gr$$

بررسی یک موضوع مهم

همانطورکه مشاهده کردید، در آزمایش دانه‌بندی با الک عملاً بعد از الک ۲۰۰ NO، الک دیگری نداریم* و در زیر الک‌ها، یک ظرف (Pan) قرار می‌گیرد تا قسمت ریزدانهٔ خاک روی آن جمع شود. در مکانیک خاک برای اینکه درصد ذرات مختلف قسمت ریزدانهٔ خاک مشخص شود، از **آزمایش هیدرومتری** استفاده می‌کنیم. در این آزمایش با توجه به سرعت سقوط ذرات در طی آزمایش، که با کمک وسیله‌ای به نام هیدرومتر مشخص می‌گردد، ابتدا در مورد قطر ذرات و سپس در مورد درصد وزنی آنها اظهار نظر می‌شود. شما می‌توانید شرح کامل این آزمایش را در قسمت تکمیلی این فصل ببینید.

در ادامهٔ بحث، به رسم منحنی دانه‌بندی می‌پردازیم.

A-۲- آشنایی با منحنی دانه‌بندی خاک

همانطورکه گفتیم، با کمک آزمایش‌های دانه‌بندی با الک و هیدرومتری، می‌توانیم بفهمیم که چند درصد از ذرات خاک از نظر وزنی، قطری کمتر از d_i دارند. این موضوع به ما کمک می‌کند تا منحنی دانه‌بندی را برای یک خاک ترسیم کنیم.

منحنی دانه‌بندی نموداری است که محور افقی آن اندازهٔ ذرات خاک در مقیاس لگاریتمی را نشان می‌دهد و محور قائم آن نیز مشخص‌کنندهٔ درصد وزنی ذراتی است که از یک قطر مشخص ریزتر هستند.

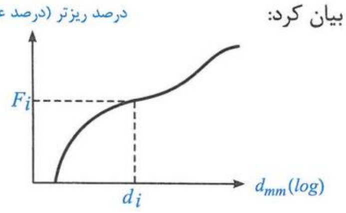
---

* اگر بخواهیم الکی ریزتر از الک شمارهٔ ۲۰۰ داشته باشیم، عملاً بایستی اکثر مساحت الک را به سیم‌ها اختصاص دهیم. علاوه بر این احتمال چسبیدن ذرات رس به سیم‌های الک نیز بسیار زیاد است. پس الک ریزتر از الک شمارهٔ ۲۰۰ کارایی ندارد.

برای هر نقطه از منحنی دانه‌بندی با مختصات (d_i , F_i) می‌توان دو تفسیر به صورت زیر بیان کرد:

۱ F_i درصد از ذرات خاک، از الک با قطر d_i عبور کرده‌اند.

۲ F_i درصد از ذرات خاک، دارای قطری کوچکتر از d_i هستند.



اندازهٔ دانه‌ها (بعد چشمه الک) برحسب mm و در مقیاس لگاریتمی

حل تمرین زیر، درک بهتری از منحنی دانه‌بندی به شما خواهد داد:

تمرین ۲: منحنی دانه‌بندی شکل مقابل را در نظر گرفته و با توجه به آن، به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۱- حداقل و حداکثر اندازهٔ دانه‌های این خاک چقدر است؟

۲- چند درصد ذرات خاک قطری کمتر از ۶ mm دارند؟

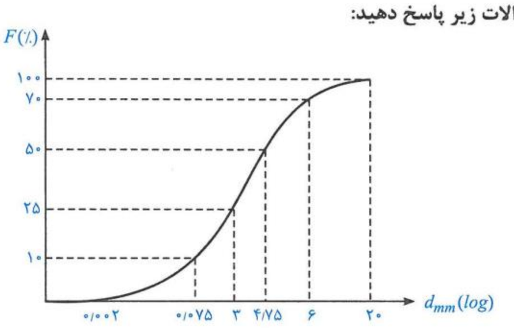
۳- ۹۰ درصد ذرات خاک از چه قطری بزرگتر هستند؟

۴- چند درصد ذرات خاک قطری بین ۳ mm و ۶ mm دارند؟

۵- چند درصد ذرات این خاک ریزدانه هستند؟

۶- چند درصد ذرات این خاک شن هستند؟

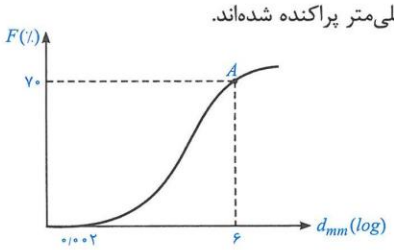
۷- چند درصد ذرات این خاک ماسه هستند؟



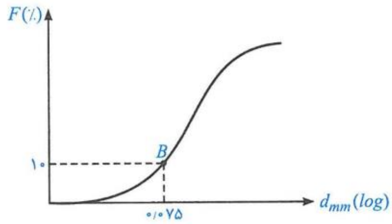
حل:

۱ همانطورکه از روی محور افقی نمودار مشخص است، منحنی دانه‌بندی از قطر ۰/۰۰۲ mm شروع شده و در قطر ۲۰ mm به آخر رسیده است. بنابراین می‌توان گفت که ذرات این خاک در محدودهٔ قطری بین ۰/۰۰۲ تا ۲۰ میلی‌متر پراکنده شده‌اند.

۲ ابتدا نقطهٔ متناظر با قطر $d = ۶\ mm$ را روی منحنی در نظر می‌گیریم (نقطهٔ A). ملاحظه می‌کنید که درصد عبوری متناظر با این نقطه، $F = ۷۰\ \%$ روی محور قائم می‌باشد. حال می‌توان گفت ٪۷۰ ذرات خاک از الک با قطر ۶ mm عبور می‌کنند و این موضوع یعنی ٪۷۰ ذرات خاک قطری کمتر از ۶ mm دارند.



۳ وقتی می‌گوییم x درصد ذرات خاک بزرگتر از قطر d_i هستند، یعنی $(۱۰۰ - x)$ درصد ذرات خاک از این قطر کوچکتر می‌باشند. پس در این سؤال برای پیدا کردن قطری که ۹۰ درصد ذرات خاک از آن بزرگ‌ترند، بایستی قطری را پیدا کنیم که ٪۱۰ $(۱۰ = ۹۰ - ۱۰۰)$ ذرات خاک از آن ریزترند. برای این منظور مشابه با قسمت قبل ولی این‌بار از ٪۱۰ = F روی محور قائم نمودار شروع می‌کنیم و نقطهٔ متناظر با آن بر روی منحنی را B می‌نامیم. مشاهده می‌کنید که قطر نظیر این نقطه روی محور افقی $d = ۰/۰۷۵\ mm$ است. حال می‌توان گفت ۱۰ درصد ذرات خاک از قطر ۰/۰۷۵ mm ریزتر و ۹۰ درصد ذرات از این قطر بزرگتر هستند.



۴ اگر $d_۱ = ۳\ mm$ و $d_۲ = ۶\ mm$ باشد، برای محاسبهٔ درصد ذرات خاک که قطری بین $d_۱$ و $d_۲$ دارند، کافی است ابتدا $F_۱$ و $F_۲$ را از روی نمودار خوانده و سپس حاصل $F_۲ - F_۱$ را محاسبه کنیم:

$$\begin{cases} d_۱ = ۳\ mm \xrightarrow{\text{نمودار}} F_۱ = ۲۵\ \% \\ d_۲ = ۶\ mm \xrightarrow{\text{نمودار}} F_۲ = ۷۰\ \% \end{cases} \Rightarrow F_۲ - F_۱ = ۷۰\ \% - ۲۵\ \% = ۴۵\ \%$$

یعنی ٪۴۵ از ذرات این خاک، دارای قطری بین ۳ mm و ۶ mm هستند.

۵ برای محاسبهٔ درصد ریزدانهٔ خاک، کافی است تا F_{200} را به‌دست آوریم. به عبارت دیگر باید درصد ذرات ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر را تعیین کنیم:

$$\text{درصد ریزدانهٔ خاک} = \text{درصد ذرات ریزتر از } 0/075\,mm = \boxed{F_{200}} = 10\%$$

(F_{200}: عبوری از الک با قطر ۰/۰۷۵ میلی‌متر)

۶ برای محاسبهٔ درصد شن، با توجه به مطالب خوانده شده کافیست F_4 را محاسبه کرده و به‌صورت زیر عمل کنیم:

$$\text{درصد شن خاک} = 100 - \boxed{F_4} = 100 - 50 = 50\%$$

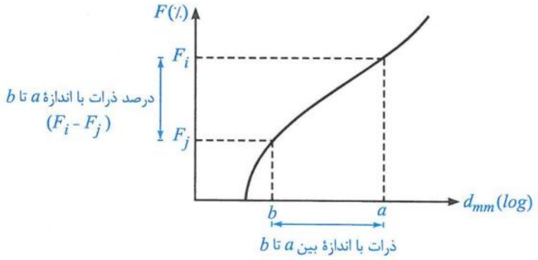
(F_4: عبوری از الک با قطر ۴/۷۵ میلی‌متر)

۷ درصد ماسهٔ خاک نیز طبق مطالب خوانه شدهٔ قبلی برابر است با:

$$\text{درصد ماسه} = \boxed{F_4} - \boxed{F_{200}} = 50 - 10 = 40\% \quad \text{یا} \quad \text{درصد ماسه} = 100 - (\text{درصد ریزدانه} + \text{درصد شن}) = 100 - (50 + 10) = 40\%$$

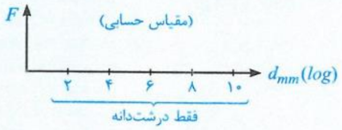
(F_4: عبوری از الک با قطر ۴/۷۵ میلی‌متر؛ F_{200}: عبوری از الک با قطر ۰/۰۷۵ میلی‌متر)

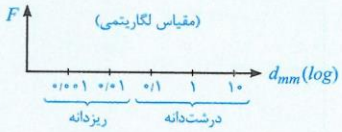
تذکر: از حل قسمت شمارهٔ (۴) این تمرین، می‌توان نتیجه گرفت که اگر F_i درصد از ذرات خاک از قطر a و F_j درصد دیگر از قطر b کوچکتر باشند، در آن‌صورت $F_i - F_j$ درصد خاک، اندازه‌ای بین a تا b خواهند داشت. این موضوع در شکل زیر نیز نشان داده شده است:



کمی توجه

می‌دانیم در یک خاک دامنهٔ تغییرات قطر ذرات، بسیار وسیع است و می‌تواند از ۰/۰۰۱ تا ۷۵ میلی‌متر تغییر کند. اما در ترسیم منحنی دانه‌بندی، روی محور افقی فضای محدودی در اختیارمان است و اگر از مقیاس حسابی استفاده شود، بخش ریزدانهٔ خاک را عملاً نمی‌توان به‌درستی نشان داد. به‌همین دلیل محور افقی را معمولاً به‌صورت لگاریتمی رسم می‌کنند.

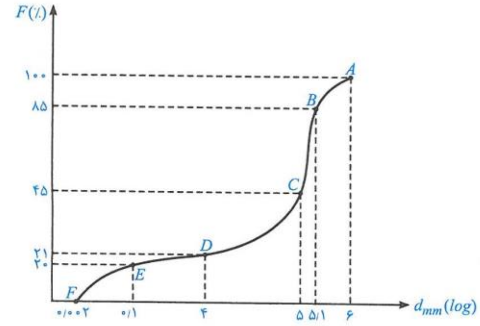




البته در برخی موارد خاص نیازی نیست که محور افقیِ نمودار، به‌صورت لگاریتمی رسم شود. در این شرایط محور افقی با همان مقیاس معمولی (حسابی) رسم می‌شود که این موضوع را در تمرین‌های بعدی خواهید دید.

در ادامه با حل دو تمرین جالب، مفاهیم بیشتری از منحنی دانه‌بندی را یاد می‌گیریم.

تمرین ۳: منحنی دانه‌بندی شکل زیر را در نظر بگیرید و در مورد درصد وزنی اندازه‌ها یا محدوده‌های مختلف قطری از دانه‌های موجود در خاک اظهار نظر کنید.



ابتدا از روی نمودار، درصد عبوری (F) متناظر با هر قطر را می‌خوانیم:

نقطهٔ A : ٪۱۰۰ ذرات خاک از قطر $۶\ mm$ کوچکتر هستند.

نقطهٔ B : ٪۸۵ ذرات خاک از قطر $۵/۱\ mm$ کوچکتر هستند.

نقطهٔ C : ٪۴۵ ذرات خاک از قطر $۵\ mm$ کوچکتر هستند.

نقطهٔ D : ٪۲۱ ذرات خاک از قطر $۴\ mm$ کوچکتر هستند.

نقطهٔ E : ٪۲۰ ذرات خاک از قطر $۰/۱\ mm$ کوچکتر هستند.

نقطهٔ F : صفر درصد ذرات خاک از قطر $۰/۰۰۲\ mm$ کوچکتر هستند، یعنی هیچ ذره‌ای از خاک از این قطر کوچکتر نمی‌باشد و قطر $۰/۰۰۲\ mm$ کوچکترین قطر ذرات خاک است.

با توجه به درصدهای قرائت شده از روی منحنی دانه‌بندی، می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

۱ ٪۴۰ ذرات خاک قطری بین $۵\ mm$ تا $۵/۱\ mm$ دارند. زیرا:

درصد ذرات خاک با اندازهٔ $۵\ mm$ تا $۵/۱\ mm$ $= F_{B\ \text{متناظر با نقطهٔ}} - F_{C\ \text{متناظر با نقطهٔ}} = ۸۵ - ۴۵ = ۴۰٪$

پس می‌توان گفت، ٪۴۰ از ذرات خاک دارای قطری در حدود $۵\ mm$ هستند.

۲ درصد وزنی ذرات خاک با اندازهٔ $۰/۱\ mm$ تا $۴\ mm$، فقط ٪۱ کل خاک را تشکیل می‌دهند، زیرا:

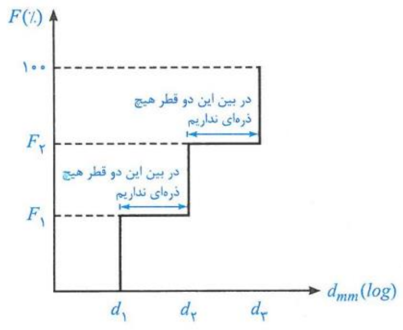
درصد ذرات خاک با اندازهٔ $۰/۱\ mm$ تا $۴\ mm$ $= F_{D\ \text{متناظر با نقطهٔ}} - F_{E\ \text{متناظر با نقطهٔ}} = ۲۱ - ۲۰ = ۱٪$

این موضوع یعنی دانه‌هایی با این اندازه ($۰/۱\ mm$ تا $۴\ mm$) تقریباً هیچ نقشی در این تودهٔ خاک ندارند. (خاک در این بازه تقریباً هیچ دانه‌ای ندارد.)

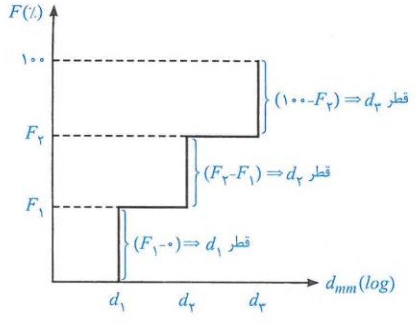
جمع‌بندی و نتایج:

از حل تمرین فوق می‌توان دو نتیجهٔ مهم زیر را گرفت:

۱ به‌طور کلی قسمت افقی در منحنی دانه‌بندی به این معنی است که خاک در آن قسمت، دانه‌ای ندارد.



۲ وجود قسمت قائم در بالای یک قطر مشخص، نشان می‌دهد که درصد معلومی از ذرات خاک، دقیقاً همان قطر مشخص را دارند که این درصد معلوم، برابر ارتفاع خط قائم منحنی دانه‌بندی در بالای همان قطر است.



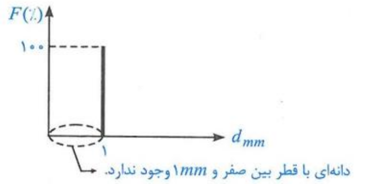
تمرین ۴: گاهی اوقات در آزمایشگاه با گوی‌های شیشه‌ای، خاک مصنوعی می‌سازند. در دو حالت زیر که خاک از گوی‌های کروی شیشه‌ای ساخته شده است، منحنی دانه‌بندی را ترسیم کنید:

الف) خاک مصنوعی و تک‌سایز با قطر $1mm$

ب) خاک مصنوعی با تعداد مساوی گوی شیشه‌ای با جنس یکسان و قطرهای $1mm$ و $2mm$ (سراسری - ۷۶)

● پاسخ قبل از پاسخ به قسمت‌های (الف) و(ب) باید بگوییم که در خاک‌های مصنوعی که از تعدادی خاک تک‌سایز تشکیل شده‌اند، نیازی نیست تا محور افقی در مقیاس لگاریتمی باشد، زیرا معمولاً در این حالت اندازهٔ ذرات خاک خیلی پراکنده و گسترده نیست. با توجه به این موضوع در این تمرین محور افقی را در مقیاس حسابی رسم کرده و خواهیم داشت:

الف) در این حالت فقط یک اندازه داریم ($1mm$) که ۱۰۰ درصد خاک را به خود اختصاص داده است. بنابراین در منحنی دانه‌بندی یک خط قائم با ارتفاع ٪۱۰۰ روی قطر $1mm$ رسم می‌شود.



ب) در این حالت با توجه به اینکه منحنی دانه‌بندی بر مبنای وزن ذرات جامد ترسیم می‌شود، ابتدا بایستی نسبت وزنی گوی‌های ۱ و ۲ میلی‌متری را بیابیم. از این‌رو می‌نویسیم:

$$W_1 = \gamma_1 V_1 = \gamma_1 \times \boxed{\frac{4}{3}\pi R_1^3} = \frac{4}{3}\pi \gamma_1 R_1^3 \qquad \text{(وزن یک گویِ ۱ میلی‌متری)}$$

حجم کرهٔ (۱)

$$W_2 = \gamma_2 V_2 = \gamma_2 \times \boxed{\frac{4}{3}\pi R_2^3} = \frac{4}{3}\pi \gamma_2 R_2^3 \qquad \text{(وزن یک گویِ ۲ میلی‌متری)}$$

حجم کرهٔ (۲)

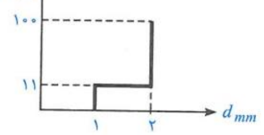
در ادامه با توجه به یکسان بودن تعداد گوی‌های ۱ و ۲ میلی‌متری خواهیم داشت:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3 \xrightarrow[R = \frac{D}{2}]{\text{جنس یکسان } (\gamma_1 = \gamma_2)} \frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 = \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}$$

بنابراین اگر خاک را به ۹ قسمت وزنی تقسیم کنیم، یک قسمت آن را گوی‌های ۱ میلیمتری و ۸ قسمت دیگر آن را گوی‌های ۲ میلی‌متری تشکیل خواهند داد. پس برای رسم منحنی دانه‌بندی این خاک به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

درصد وزنی گوی با قطر $1mm$: $\frac{1}{1+8} \times 100 = 11\%$ $\Rightarrow$ یک خط قائم با ارتفاع ٪۱۱ روی قطر $1mm$ رسم می‌کنیم.

درصد وزنی گوی با قطر $2mm$: $\frac{8}{1+8} \times 100 = 89\%$ $\Rightarrow$ یک خط قائم با ارتفاع ٪۸۹ روی قطر $2mm$ رسم می‌کنیم.



A-۳- پارامترهای منحنی دانه‌بندی

پس از آشنایی اولیه با منحنی دانه‌بندی، می‌خواهیم شما را با پارامترهای منحنی دانه‌بندی آشنا کنیم که از آنها در تعیین کیفیت دانه‌بندی و در نهایت نام‌گذاری خاک استفاده می‌شود. این پارامترها عبارتند از:

۱) پارامترهای D_{10}، D_{30} و D_{60}

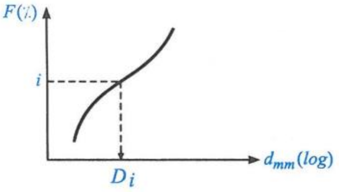
۲) پارامتر C_u

۳) پارامتر C_c

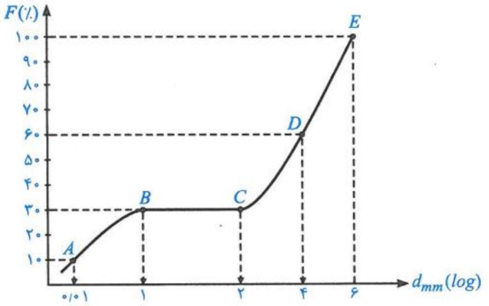
در ادامه به بررسی مفاهیم این پارامترها می‌پردازیم.

۱- آشنایی با اصطلاح‌های D_{10}، D_{30} و D_{60}

برای شروع بحث، به شکل زیر نگاه کنید. به‌طور کلی در منحنی دانه‌بندی یک خاک، D_i یعنی بزرگترین قطری که i درصد ذرات خاک از آن ریزتر هستند. بنابراین در تعریف D_{10}*، D_{30} و D_{60} می‌توان گفت، این اعداد بزرگترین قطرهایی هستند که به‌ترتیب، ۱۰ درصد، ۳۰ درصد و ۶۰ درصد ذرات خاک از آن ریزتر می‌باشند.



برای درک بهتر این پارامترها به شکل زیر توجه کنید.



با توجه به شکل بالا می‌توان گفت:

۱ نقطهٔ A متناظر با قطری است که ٪۱۰ = F را نشان می‌دهد. بنابراین قطر متناظر با نقطهٔ A همان D_{10} می‌باشد که برابر است با:

$D_{10} = 0/01\,mm$

۲ کلیهٔ نقاط بین B تا C متناظر با قطرهایی هستند که برای آنها ٪۳۰ = F می‌باشد. در اینگونه موارد طبق تعریف، بزرگترین قطر را به‌عنوان D_{30} انتخاب می‌کنیم که در شکل رسم شده، نقطهٔ C می‌باشد و داریم:

$D_{30} = 2\,mm$

۳ نقطهٔ D متناظر با قطری است که ٪۶۰ = F را نشان می‌دهد. بنابراین قطر متناظر با نقطهٔ D همان D_{60} است که برابر است با:

$D_{60} = 4\,mm$

تمرین ۵: خاکی با توزیع یکنواخت و خطی دانه‌ها (در مقیاس حسابی)، بین قطر $0/001mm$ تا $3\,mm$ در اختیار داریم:

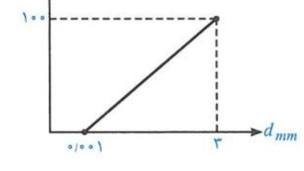
الف) منحنی دانه‌بندی این خاک را ترسیم کنید.

ب) پارامترهای D_{10}، D_{30} و D_{60} را در این خاک محاسبه کنید.

● نکته: در مواردی‌که توزیع ذرات خاک خطی است، بایستی طبق آنچه در صورت سؤال نیز گفته شده است، مقیاس محور افقی در نمودار دانه‌بندی به‌صورت حسابی باشد، زیرا در این شرایط است که منحنی دانه‌بندی به شکل یک خط بین کمترین و بیشترین قطر رسم شده و از صفر درصد به ۱۰۰ درصد می‌رسد.

اکنون با این توضیح به حل تمرین می‌پردازیم:

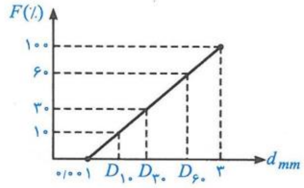
الف) شکل منحنی دانه‌بندی با توجه به مطلب فوق به‌صورت مقابل است:

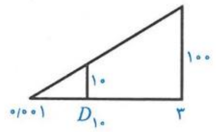


---

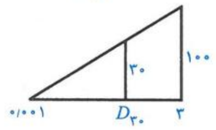
* به D_{10}، اندازهٔ مؤثر یا قطر مؤثر گفته می‌شود.

ب) در ادامه، مقادیر D_{10}، D_{30} و D_{60} را به‌صورت زیر و با کمک قضیه تالس محاسبه می‌کنیم:

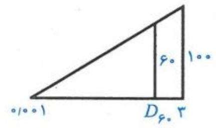




$$\Rightarrow \frac{3-0.001}{D_{10}-0.001}=\frac{100}{10} \Rightarrow D_{10}=0.3009\,mm \simeq 0.3\,mm$$



$$\Rightarrow \frac{3-0.001}{D_{30}-0.001}=\frac{100}{30} \Rightarrow D_{30}=0.9007\,mm \simeq 0.9\,mm$$



$$\Rightarrow \frac{3-0.001}{D_{60}-0.001}=\frac{100}{60} \Rightarrow D_{60}=1.8004\,mm \simeq 1.8\,mm$$

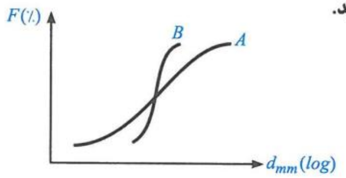
۲- آشنایی با مفهوم C_u

در مکانیک خاک برای نشان دادن محدودهٔ ذرات خاک و گستردگی منحنی دانه‌بندی، از پارامتری به‌نام **ضریب یکنواختی** استفاده می‌شود که آن را با C_u نشان می‌دهیم و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

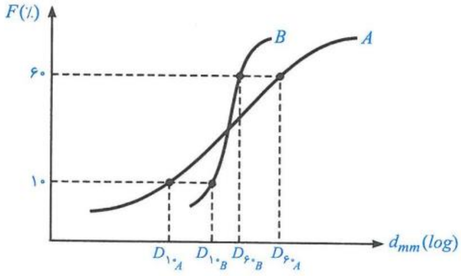
$$C_u=\frac{D_{60}}{D_{10}}$$

در ادامه با حل یک تمرین، مفهوم ضریب C_u را بررسی خواهیم کرد.

تمرین ۶: با توجه به منحنی دانه‌بندی رسم شده برای دو خاک A و B، ضریب C_u آنها را مقایسه کنید.



● پاسخ: برای مقایسه C_u در این دو خاک، ابتدا باید D_{10} و D_{60} آنها را با هم مقایسه کنیم. بدین منظور درصدهای عبوری $F=10\%$ و $F=60\%$ را روی محور قائم مدنظر قرار داده و دو خط‌چین افقی از آنها رسم می‌کنیم تا این منحنی‌ها را قطع کنند. سپس به‌صورت قائم از روی منحنی پایین می‌آییم تا با قطع محور افقی، D_{10} و D_{60} مربوط به این خاک‌ها به‌دست آید.



$\xrightarrow{\text{نمودار دانه‌بندی}} (D_{10})_A < (D_{10})_B \quad , \quad (D_{60})_A > (D_{60})_B$

در ادامه با توجه به اینکه خاک A دارای D_{10} کوچکتر و D_{60} بزرگتری می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که C_u در خاک A بزرگتر از C_u در خاک B است.

$$\boxed{C_u}\uparrow=\frac{\boxed{D_{60}}\uparrow}{\boxed{D_{10}}\downarrow} \Rightarrow C_{u_A} > C_{u_B}$$

نتیجه‌گیری

با توجه به منحنی‌های دانه‌بندی مطرح شده در تمرین صفحهٔ قبل و مقایسه C_u آنها می‌توان گفت، به‌طور کلی هرچقدر C_u در یک خاک کوچکتر باشد (مثل خاک B)، منحنی دانه‌بندی قائم‌تر بوده و دانه‌بندی خاک محدودتر می‌شود. در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم خاک به حالت تک سایز نزدیک شده است. از طرف دیگر بزرگ بودن C_u نشان‌دهندهٔ پراکندگی گستردهٔ ذرات خاک و تنوع در اندازهٔ دانه‌های جامد خاک است. (مثل خاک A)

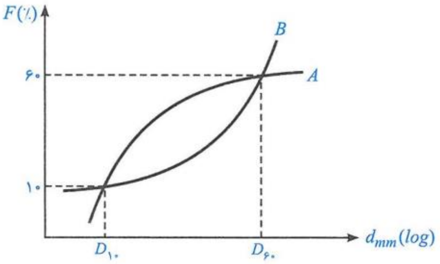
۳- آشنایی با مفهوم C_c

در مکانیک خاک برای بررسی انحنای ایجاد شده در منحنی دانه‌بندی، از پارامتری به نام **ضریب انحناء (ضریب خمیدگی یا ضریب دانه‌بندی)** استفاده می‌شود که آن را با C_c نشان می‌دهیم و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

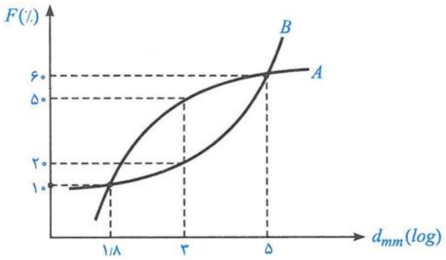
$$C_c = \frac{D_{30}^{2}}{D_{60} \times D_{10}}$$

در ادامه با حل یک تمرین، درک بهتری از این پارامتر خواهیم داشت.

تمرین ۷: منحنی دانه‌بندی در دو خاک A و B را در نظر بگیرید. با توجه به این نمودارها کدام خاک ریزدانه‌تر است؟ پارامترهای C_u و C_c در این دو خاک را با هم مقایسه کنید.



حل: برای پاسخ به قسمت اول این تمرین، اعداد فرضی زیر را بر روی منحنی‌های دانه‌بندی در نظر بگیرید:

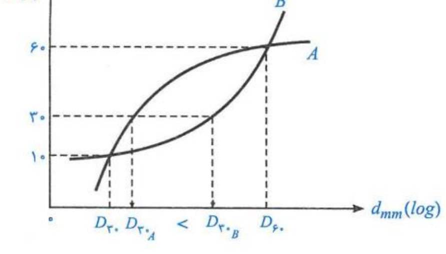


همانطورکه ملاحظه می‌کنید ٪۵۰ ذرات خاکِ A از ۳ میلی‌متر ریزترند، در حالی که برای خاکِ B فقط ٪۲۰ ذرات خاک از ۳ میلی‌متر ریزتر می‌باشند، پس خاک B درشت‌دانه‌تر بوده و خاک A ریزدانه‌تر است.

برای مقایسه C_u و C_c در این دو خاک نیز می‌توان گفت:

مقایسه C_u: چون D_{10} و D_{60} در هر دو خاک با هم برابر است، بنابراین $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ نیز در هر دو خاک یکسان است.

مقایسه C_c: به شکل مقابل توجه کنید:



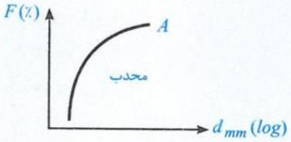
با توجه به شکل می‌توان گفت:

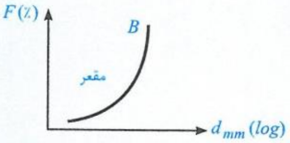
$$D_{30_B} > D_{30_A} \;,\; D_{60_A} = D_{60_B} \;,\; D_{10_A} = D_{10_B} \;\Rightarrow\; C_{c_B} = \left(\frac{D_{30}^{2}}{D_{60} \times D_{10}}\right)_B > C_{c_A} = \left(\frac{D_{30}^{2}}{D_{60} \times D_{10}}\right)_A$$

نتیجه‌گیری

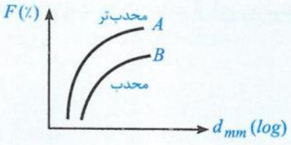
از این تمرین نتایج مهم زیر به‌دست می‌آید:

۱- منحنی دانه‌بندی A یک منحنی محدب و منحنی دانه‌بندی B یک منحنی مقعر است.

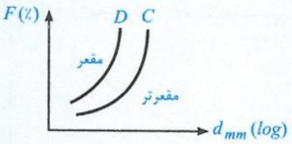




۲- هرچه منحنی دانه‌بندی محدب‌تر باشد، خاک ریزدانه‌تر است و بالعکس یعنی هرچه منحنی دانه‌بندی مقعرتر باشد، خاک درشت‌دانه‌تر می‌باشد.



خاک A از B ریزدانه‌تر است.

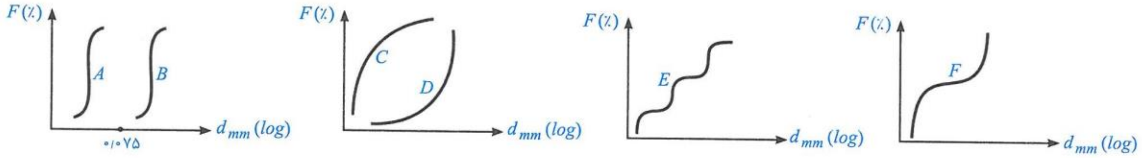


خاک C از D درشت‌دانه‌تر است.

۳- هر چه خاکی درشت‌دانه‌تر و منحنی دانه‌بندی آن مقعرتر باشد، C_c آن بزرگتر خواهد بود. در طرف مقابل هر چه خـاکی ریزدانـه‌تـر و منحنی دانه‌بندی آن محدب‌تر باشد، C_c آن کوچکتر است.

در ادامه به حل چند تمرین متنوع دیگر می‌پردازیم.

تمرین ۸: خاک مربوط به هریک از منحنی‌های دانه‌بندی شده در شکل زیر را چگونه توصیف می‌کنید؟



پاسخ

منحنی A: دانه‌بندی خاک یکنواخت است و فاقد درشت‌دانه می‌باشد. (قطرهای بیشتر از $0/075\ mm$ را ندارد) در این حالت C_u کوچک و تقریباً برابـر یک است. $(D_{10} \simeq D_{60} \Rightarrow C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \simeq 1)$

منحنی B: دانه‌بندی خاک یکنواخت است و فاقد ریزدانه می‌باشد. (قطرهای کمتر از $0/075\ mm$ را ندارد) در این حالت نیز C_u کوچک و تقریباً برابـر یک است. $(D_{10} \simeq D_{60} \Rightarrow C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \simeq 1)$

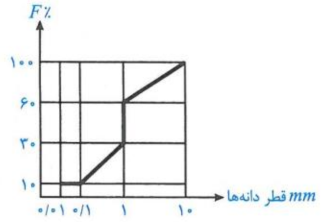
منحنی C: دانه‌بندی خاک گستردگی خوبی دارد (C_u بزرگ و مناسب) ولی بیـشتر ذرات خـاک ریزدانـه‌انـد (محـدب بـودن منحنـی و C_c کوچک).

منحنی D: دانه‌بندی خاک گستردگی خوبی دارد (C_u بزرگ و مناسب) ولی بیشتر ذرات خاک درشت‌دانـه‌انـد (مقعـر بـودن منحنـی و C_c بزرگ).

منحنی E: خاک با دانه‌بندی منفصل که در آن بعضی از اندازه‌های خاک را نداریم یا خیلی کم داریم.

منحنی F: خاک با دانه‌بندی منفصل که فاقد (یا دارای درصد کمی از) دانه‌های متوسط است و به آن خاک میان‌تهی گفته می‌شود. به‌عنوان مثال خاک F می‌تواند از ترکیب مقداری مساوی از خاک‌های A و B تشکیل شده باشد (به‌دلیل این موضوع فکر کنید).

تمرین ۹: **در صورتی که ضریب یکنواختی (C_u) و ضریب خمیدگی (C_c) خاک به‌وسیلهٔ فرمول‌های زیر ارائه شود، مقادیر ضرایب فوق را به‌ترتیب معین کنید.** $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$, $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$ (سراسری - ۷۴)



۱) ۱ و ۱۰۰
۲) ۱۰۰ و ۱
۳) ۱۰ و ۱۰
۴) ۱۰ و ۱

● حل: از روی شکل منحنی دانه‌بندی معلوم است که $D_{60} = D_{30} = 1\,mm$ می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه D_{10} بزرگترین قطری است که ۱۰ درصد ذرات خاک از آن ریزترند، قطر ۰/۱ را به‌عنوان D_{10} انتخاب می‌کنیم (۰/۰۱ را انتخاب نمی‌کنیم) و خواهیم داشت:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1}{0/1} = 10$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{1^2}{1 \times 0/1} = 10$$

بنابراین گزینه (۳) درست است.

بررسی یک نکته کاربردی

خاک خوب دانه‌بندی شده به خاکی گفته می‌شود که از تمام ذرات خاک به میزان کافی و تقریباً مساوی داشته باشد. برای این منظور منحنی دانه‌بندی بایستی اولاً گستردگی مناسبی داشته باشد (C_u در آن از یک مقدار حداقل بیشتر باشد)، ثانیاً نه خیلی محدب و نه خیلی مقعر باشد (C_c آن در یک محدودهٔ مشخصی باشد).

آیین‌نامهٔ متحد (*unified*) برای بررسی خوب دانه‌بندی شدن خاک‌های درشت‌دانه (شن و ماسه) دو شرط زیر را کنترل می‌کند که بایستی توأماً برقرار باشند:

● **شرط اول:** در خاک‌های شنی $C_u \geq 4$ و خاک‌های ماسه‌ای $C_u \geq 6$ باشد.

● **شرط دوم:** در هر دو خاک شن و ماسه بایستی $1 \leq C_c \leq 3$ باشد.

شرط $C_c \geq 1$ باعث می‌شود که منحنی دچار تحدب شدید نشود و به سمت ریزدانه بودن تمایل پیدا نکند و شرط $C_c \leq 3$ نیز جلوی تقعر شدید منحنی و تمایل آن به سمت درشت دانه‌ها را می‌گیرد.

لازم به ذکر است که ضرایب C_c و C_u برای خاک‌هایی که درصد ریزدانه آنها از ۱۲ درصد بیشتر است، به‌کار نمی‌روند و فاقد کاربرد مهندسی می‌باشند.

تمرین ۱۰: **برای یک نمونه خاک در آزمایش دانه‌بندی به روش مکانیکی $D_{10} = 0/6\,mm$ و $D_{60} = 5\,mm$ به‌دست آمده است. برای آنکه چنین خاکی با دانه‌بندی خوب ارزیابی شود، محدودهٔ D_{30} چقدر باید باشد؟** (سراسری - ۸۶)

۱) $3\,mm > D_{30} > 1/7\,mm$
۲) $9\,mm > D_{30} > 3\,mm$
۳) $16/8\,mm > D_{30} > 5/6\,mm$
۴) $4/1\,mm > D_{30} > 2/4\,mm$

● حل: برای اینکه خاکی خوب دانه‌بندی شده ارزیابی شود، حتماً بایستی $1 \leq C_c \leq 3$ باشد، بنابراین می‌نویسیم:

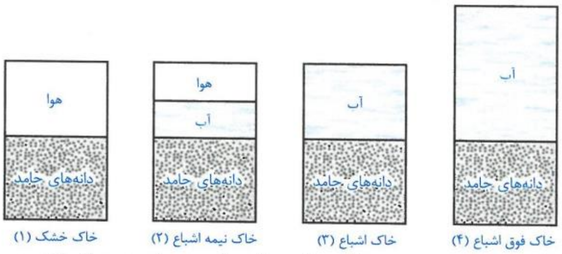
$$1 \leq C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \leq 3 \Rightarrow 1 \leq \frac{D_{30}^2}{5 \times 0/6} \leq 3 \Rightarrow \sqrt{3} \leq D_{30} \leq 3 \Rightarrow 3\,mm \geq D_{30} \geq 1/7\,mm$$

بنابراین گزینهٔ (۱) جواب این تست است.

B-۱- معرفی حدود اتربرگ و مفاهیم آن

همانطور که در قسمت اول فصل گفته شد، در مورد خاک‌های ریزدانه، رفتار خاک در برابر رطوبت از اهمیت زیادی برخوردار است. خاک‌های درشت‌دانه به هنگام مواجه شدن با رطوبت‌های مختلف تغییری در شکل ظاهری و رفتارشان ایجاد نمی‌شود، این در حالی است که خاک‌های ریزدانه پتانسیل جذب آب زیادی دارند و رفتار آنها در درصدهای رطوبت مختلف متفاوت است. در علم مکانیک خاک، معیار سنجش رفتار خاک‌های ریزدانه بر مبنای تحقیقات دانشمندی سوئدی به نام اتربرگ (۱۹۱۱) بنا شده است.

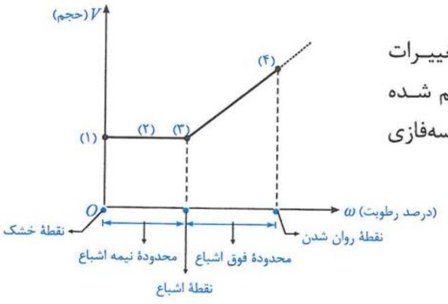
برای بررسی رفتار خاک‌های ریزدانه در رطوبت‌های مختلف، دیاگرام‌های سه فازی زیر را در نظر بگیرید. این دیاگرام‌ها مربوط به یک خاک رسی از لحظهٔ خشک بودن تا لحظه‌ای است که در اثر رطوبت زیاد افزایش حجم داده و در نهایت روان شده است.



در ادامه می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، مفاهیم این قسمت را بهتر درک کنیم:

بررسی چند سوال

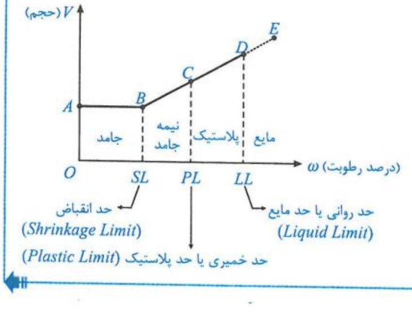
سؤال ۱: با توجه به دیاگرام‌های سه فازی فوق، نمودار تغییرات حجم رس در برابر رطوبت، از ابتدا تا لحظهٔ روان شدن چگونه خواهد بود؟



پاسخ: در شکل مقابل نمودار تغییرات حجم خاک در برابر رطوبت ترسیم شده است و نقاط متناظر با دیاگرام‌های سه‌فازی بالا نیز نشان داده شده‌اند.

سؤال ۲: نموداری که در سؤال قبل در مورد آن صحبت شد، مبنای بحث‌های اتربرگ در مورد رفتار خاک رس می‌باشد. اتربرگ چگونه از این نمودار در مورد رفتار خاک رس کمک می‌گیرد؟

پاسخ: اتربرگ برای آنکه رفتار خاک رس را بسنجد، در نمودار فوق سه مرز را مشخص می‌کند که این مرزها در شکل زیر نشان داده شده‌اند. عملاً با این مرزبندی، نمودار رفتار خاک رس به چهار ناحیه تقسیم می‌شود که در هر ناحیه، وضعیت ظاهری رس با توجه به مقدار رطوبت آن، متفاوت است.



قسمت دوم (آشنایی با حدود اتربرگ)

زیر شاخه‌های قسمت دوم

B-۱- معرفی حدود اتربرگ و مفاهیم آن
B-۲- پارامترهای مرتبط با حدود اتربرگ
B-۳- کاربرد مفاهیم حدود اتربرگ در مسائل وزنی و حجمی

سؤال ۳: ویژگی نواحی AB، BC، CD و DE چیست؟

● پاسخ: ویژگی هر یک از نواحی تعریف شده در نمودار حدود اتربرگ عبارت است از:

ناحیهٔ AB: در این ناحیه، خاک در فاز جامد است و رفتار آن ترد و شکننده می‌باشد، مانند خاک رس خشک در کویر و یا خاک رس که روی لباس خشک می‌شود.

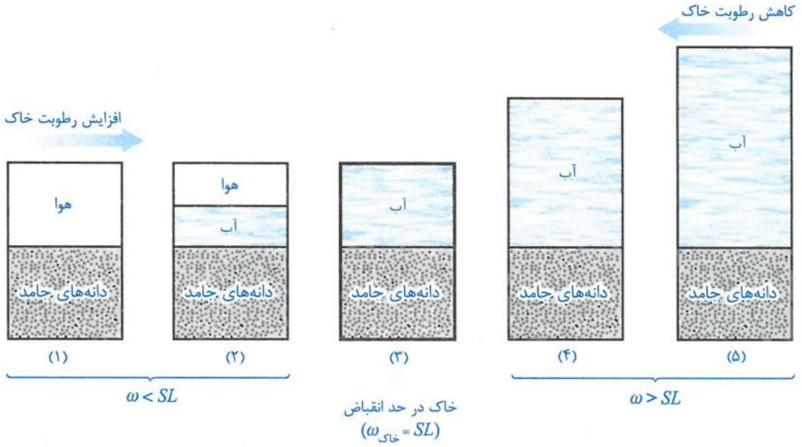
ناحیه BC: در این ناحیه، خاک حالت نیمه جامد دارد، مانند گل سفت موجود در باغچه.

ناحیه CD: در این ناحیه، خاک در حالت پلاستیک (خمیری) قرار داشته و بسیار شکل‌پذیر است، مانند خمیر رس که در سفالگری از آن استفاده می‌شود.

ناحیهٔ DE: دراین ناحیه، خاک به علت آب فراوان به حالت روان در آمده و در فاز مایع است و عملاً شکل لجن دارد.

جمع‌بندی:

۱) نمودار اتربرگ نشان می‌دهد که **حد انقباض** (SL) درصد رطوبتی است که از آن به بعد با افزایش آبِ خاک، رفتار نمونه از حالت جامد به حالت نیمه جامد تغییر می‌کند. علاوه بر این می‌توان با کمک شکل‌های زیر، دو تعریف دیگر را نیز برای حد انقباض مطرح کرد:



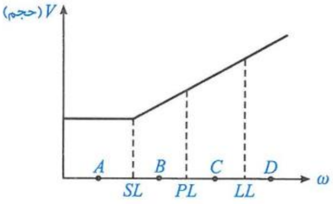
تعریف ۱: اگر از شکل (۱) شروع کرده و رطوبت خاک را افزایش دهیم، می‌توانیم بگوییم در یک خاک ریزدانه، حد انقباض حداقل درصد رطوبتی است که به ازاء آن خاک اشباع می‌شود (یعنی به‌ازاء رطوبت‌های قبل از آن خاک اشباع نخواهد بود). عبارت فوق، متداول‌ترین و ساده‌ترین بیان برای تعریف حد انقباض می‌باشد.

تعریف ۲: اگر از شکل (۵) شروع کنیم و رطوبت خاک را به‌تدریج کاهش دهیم می‌توانیم بگوییم، حد انقباض درصد رطوبتی است که از آن به بعد با کاهش آب موجود در خاک، نمونه تغییر حجم نداده و دیگر منقبض نمی‌شود. یعنی اگر در شکل سوم رطوبت را باز هم کاهش دهیم، دیگر حجم خاک کاهش نیافته و خاک منقبض‌تر نمی‌شود. به‌همین علت به آن حد انقباض می‌گویند.

۲) **حد خمیری** (PL) درصد رطوبتی است که از آن به بعد با افزایش آبِ خاک، رفتار نمونه از حالت نیمه جامد به حالت خمیری تغییر می‌کند. به عبارت دیگر حد خمیری حداقل درصد رطوبتی است که به ازای آن خاک رفتاری خمیری و شکل‌پذیر دارد.

۳) **حد روانی** (LL) درصد رطوبتی است که از آن به بعد با افزایش آبِ خاک، نمونه به‌صورت مایع در آمده و روان می‌شود. لازم به ذکر است که در این شرایط (بعد از حد روانی و روان شدن خاک) خاک مقاومت خود را به‌طور کامل از دست می‌دهد.

۴) با توجه به محدودهٔ رطوبتی خاک رس، می‌توان به‌صورت زیر در مورد وضعیت ظاهری خاک در نقاط A، B، C و D اظهار نظر کرد:



$A: \omega_A < SL \Rightarrow$ خاک A حالت جامد دارد.

$B: SL < \omega_B < PL \Rightarrow$ خاک B حالت نیمه جامد دارد.

$C: PL < \omega_C < LL \Rightarrow$ خاک C حالت خمیری و شکل‌پذیر دارد.

$D: \omega_D > LL \Rightarrow$ خاک D مثل مایع شده است.

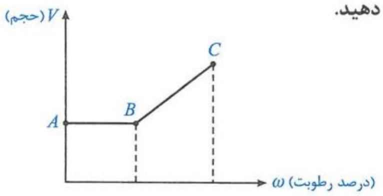
در ادامه با حل دو تمرین، بر روی مفاهیم گفته شده مسلط‌تر می‌شویم.

تمرین ۱۱: با توجه به نمودار شکل مقابل که مربوط به یک خاک رسی است، به سؤالات زیر پاسخ دهید.

الف) نشانهٔ خلاء از نقطهٔ A تا C چگونه تغییر می‌کند؟

ب) درصد اشباع خاک از A تا C چگونه تغییر می‌کند؟

ج) شیب خط BC چه پارامتری را نشان می‌دهد؟



پاسخ

الف) با توجه به مفهوم نمودار $V-\omega$، در دو محدودهٔ AB و BC داریم:

از A تا B $\Rightarrow e=\dfrac{V_v}{V_s} \Rightarrow$ e ثابت است. (V_v: ثابت است. V_s: ثابت است.)

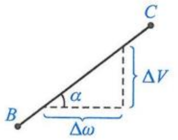
از B تا C $\Rightarrow e=\dfrac{V_v}{V_s} \Rightarrow$ e زیاد می‌شود. (V_v: افزایش می‌یابد. V_s: ثابت است.)

ب) در تحلیل تغییرات درصد اشباع از A تا C، در دو محدودهٔ AB و BC به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

از A تا B $\Rightarrow S_r=\dfrac{V_w}{V_v} \Rightarrow$ S_r زیاد می‌شود. (V_w: زیاد می‌شود. V_v: ثابت است.)

از B تا C $\Rightarrow S_r=\dfrac{V_w}{V_v} \Rightarrow$ $S_r=100\%$ و ثابت است. (V_w و V_v: هر دو با هم برابر بوده و به یک مقدار زیاد می‌شوند.)

ج) با ترسیم قسمت BC از این نمودار و مشخص کردن تغییرات رطوبت و حجم روی آن، خواهیم داشت:



$$\tan\alpha=\frac{\Delta V}{\Delta\omega}=\frac{\Delta V_w}{\Delta\omega}=\frac{\Delta V_w}{\dfrac{\Delta W_w}{W_s}}=\frac{W_s}{\gamma_w}$$

دقت شود که در قسمت BC، تغییر حجم خاک در اثر تغییر حجم آب ایجاد می‌شود ($\Delta V=\Delta V_w$).

تمرین ۱۲: حد انقباض عبارت است از: (سراسری - ۸۴)

۱) حداقل رطوبتی که خاک تحت آن به توده‌ای نیمه‌جامد تبدیل می‌گردد.

۲) حداقل رطوبتی که تحت آن خاک به‌علت وزن خود جریان می‌یابد.

۳) حداقل رطوبتی که با ازدست رفتن بیشتر رطوبت، خاک کاهش حجم نمی‌دهد.

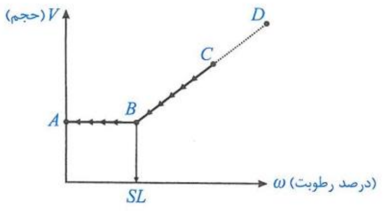
۴) حداکثر رطوبتی که در آن با ازدست رفتن بیشتر رطوبت، خاک کاهش حجم نمی‌دهد.

پاسخ این تست یکی از سؤالاتی است که اکثر دانشجویان با مفهوم آن مشکل دارند و بارها در کلاس‌های کنکور ارشد پرسیده شده و مورد بحث قرار می‌گیرد. بهترین راه برای پاسخ به آن، بررسی تک‌تک گزینه‌ها می‌باشد:

گزینه ۱: در این گزینه کلمه‌های «حداقل» و «تبدیل» نباید با هم آورده شوند، یعنی یا باید گفته شود که حد انقباض رطوبتی است که خاک تحت آن به توده‌ای نیمه جامد تبدیل می‌شود (منظور از حالت جامد به نیمه جامد) و یا بگوییم که حد انقباض حداقل رطوبتی است که به ازای آن خاک توده‌ای نیمه جامد است. پس این گزینه ایراد دارد و جواب نیست.

گزینه ۲: این گزینه تعریف حد روانی است و جواب ما نمی‌باشد.

گزینه‌های ۳ و ۴: برای بررسی این دو گزینه بهتر است به شکل مقابل توجه کنید:



همانطورکه ملاحظه می‌کنید در ناحیهٔ AB با از دست رفتن رطوبت، خاک کاهش حجم نمی‌دهد که حداقل رطوبت در این ناحیه صفر و حداکثر آن برابر SL است، به عبارتی SL، حداکثر رطوبتی است که در آن حالت با از دست رفتن بیشتر رطوبت، خاک کاهش حجم نمی‌دهد. بنابراین گزینهٔ (۴) جواب درست این تست می‌باشد.

B-۲- پارامترهای مرتبط با حدود اتربرگ

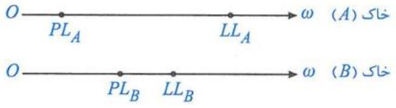
در این قسمت می‌خواهیم پارامترهای مرتبط با حدود اتربرگ را در یک خاک بررسی کرده و ببینیم چگونه می‌توان با استفاده از این پارامترها، خاک را بهتر شناخت. برای شروع، ابتدا این پارامترها را معرفی می‌کنیم:

۱- نشانهٔ خمیری یا دامنهٔ خمیری (PI)　　۲- نشانهٔ مایع یا شاخص روانی (LI)　　۳- فعالیت (A)

در ادامه هر یک از این پارامترها را جداگانه بررسی خواهیم کرد.

۱- نشانهٔ خمیری (PI)

در اینجا می‌خواهیم شما را با پارامتری آشنا کنیم که میزان استعداد و قابلیت خاک رس در شکل‌پذیری و خمیری شدن را نشان می‌دهد. برای درک بهتر مفهوم این پارامتر، دو شکل زیر را در نظر بگیرید که در آنها، دو خاک A و B با حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) متفاوت در کنار هم نشان داده شده‌اند.

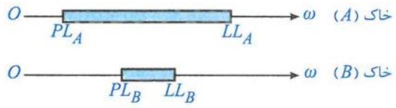


با توجه به این دو شکل، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) PL_A کمتر از PL_B است. این موضوع یعنی خاک A نسبت به خاک B با رطوبت کمتری به حالت خمیری در می‌آید.

۲) LL_A بیشتر از LL_B است، بنابراین خاک A نسبت به خاک B با رطوبت بیشتری از حالت خمیری در می‌آید و روان می‌شود.

۳) محدودهٔ بین PL و LL را می‌توان محدوده‌ای در نظر گرفت که در آن، خاک خاصیت خمیری دارد. با توجه به شکل‌های زیر، این محدوده برای خاک A بیشتر از خاک B است. به عبارت دیگر محدوده‌ای که در آن خاک A خاصیت پلاستیک و خمیری دارد، از محدودهٔ خمیری خاک B بیشتر است.



۴) در مکانیک خاک برای نشان دادن محدودهٔ خمیری (پلاستیک) خاک رس که بیانگر استعداد خمیری شدن و شکل‌پذیری این خاک است، از پارامتری به نام **نشانهٔ خمیری** یا **دامنهٔ خمیری** استفاده می‌شود. دامنهٔ خمیری که آن را با PI نشان می‌دهند، در واقع تفاضل LL و PL بوده که شما آن را در نمودارهای بالا نیز مشاهده کردید:

$$PI = LL - PL$$

۵) هر چه خاکی PI بزرگتری داشته باشد، LL آن بزرگتر و PL آن کوچکتر خواهد بود.

$$\overset{\uparrow}{PI} = \overset{\uparrow}{LL} - \overset{\downarrow}{PL}$$

بررسی یک موضوع مهم

نشانهٔ خمیری یک خاک بستگی به دو عامل دارد:

۱) درصد وزنی ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون ($0/002\ mm$) که هر چه بیشتر باشند، خاک رس PI بزرگتری خواهد داشت.

۲) نوع کانی‌های رسی به این ترتیب که در درصد وزنی یکسان، رس مونت موریلونیت PI بیشتری نسبت به ایلیت و ایلیت نیز PI بیشتری نسبت به کائولینیت ایجاد خواهد کرد.

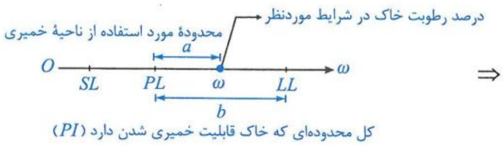
تمرین ۱۳: با توجه به جدول زیر، کدام‌یک از خاک‌های زیر خاصیت خمیری بیشتری دارند؟ به‌نظر شما کدام‌یک از این خاک‌ها در کارگاه ساختمانی در یک منطقهٔ باران‌خیز دردسر بیشتری ایجاد می‌کنند؟

	A	B	C	D
LL	۴۲	۴۵	۴۸	۴۹
PL	۲۲	۲۱	۱۹	۱۶

پاسخ: خاک D که LL بیشتر و PL کمتری دارد (یعنی PI بزرگتر) خمیری‌تر است و خاک A که LL کمتر و PL بیشتری دارد، (یعنی PI کمتر) خاصیت خمیری کمتری دارد. همچنین خاک A در کارگاه دردسر بیشتری ایجاد می‌کند، زیرا LL آن کمتر از خاک‌های دیگر بوده و به هنگام بارندگی با رطوبت کمتری روان شده و یک حالت لجنی در کف کارگاه ایجاد می‌کند.

۲- نشانهٔ مایع (LI)

همانطورکه دیدیم، استعداد یک خاک رس در خمیری شدن، با پارامتر PI سنجیده می‌شود. حال سؤال آن است که در یک رطوبت دلخواه مانند ω، چه میزان از این قابلیت توسط خاک استفاده شده است. برای بررسی این موضوع از پارامتر LI استفاده می‌شود که به آن **نشانه مایع** یا **شاخص روانی** گفته می‌شود و به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:



$$\Rightarrow \; LI = \frac{a}{b} = \frac{\omega - PL}{LL - PL}$$

تمرین ۱۴: شاخص روانی (LI) برای دو نوع خاک رسی در آزمایشگاه به ترتیب ۰/۸۱ و صفر به دست آمده است. خاک رس اول در حالت .... و خاک رس دوم در حد .... است. (سراسری - ۹۱)

۱) روانی - روانی ۲) روانی - پلاستیک ۳) خمیری - پلاستیک ۴) خمیری - روانی

پاسخ: با توجه به رابطهٔ مربوط به LI داریم:

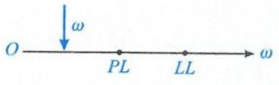
$LI = ۰/۸۱ \Rightarrow ۰ < \frac{\omega - PL}{LL - PL} < ۱ \Rightarrow PL < \omega < LL \Rightarrow$ خاک در ناحیه خمیری (پلاستیک) است.

$LI = ۰ \Rightarrow \frac{\omega - PL}{LL - PL} = ۰ \Rightarrow \omega = PL \Rightarrow$ خاک در حد خمیری (پلاستیک) است.

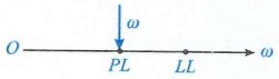
بنابراین گزینه (۳) درست است.

بیشتر بدانیم

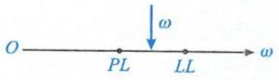
در مورد LI، وضعیت ظاهری و شرایط خاک در هر محدوده، می‌توان به‌صورت زیر اظهار نظر کرد:



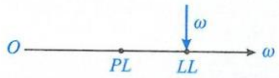
$\omega < PL \Rightarrow LI < ۰ \Rightarrow$ رس سخت و کم آب (ناحیهٔ جامد و نیمه جامد)



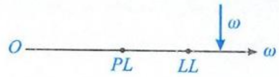
$\omega = PL \Rightarrow LI = ۰ \Rightarrow$ رس نسبتاً آب‌دار (حد خمیری)



$PL < \omega < LL \Rightarrow ۰ < LI < ۱ \Rightarrow$ رس آب‌دار و شکل‌پذیر (ناحیهٔ خمیری)



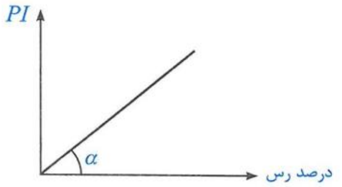
$\omega = LL \Rightarrow LI = ۱ \Rightarrow$ رس آب‌دار و نرم (حد روانی)



$\omega > LL \Rightarrow LI > ۱ \Rightarrow$ رس بسیار آب‌دار و فاقد سختی (ناحیهٔ روانی و ناپایدار شدن خاک)

۳- فعالیت خاک (A)

در فصل اول دیدیم که هر چه کانی رسی سطح ویژهٔ بزرگتری داشته باشد، جذب آب آن نیز بیشتر بوده و فعالیت بیشتری دارد. در مکانیک خاک، **فعالیت** خاک رس را با حرف A نشان می‌دهند و این پارامتر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:



$$A = \tan\alpha = \frac{PI}{\text{درصد وزنی ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون}}$$

دقت شود که در عمل می‌توانیم با کمک عدد فعالیت A، نوع کانی رسی را به‌صورت زیر تعیین کنیم:

- رس غیرفعال یا کائولینیت $\Rightarrow$ $A \le ۰/۷۵$
- رس نیمه فعال یا ایلیت $\Rightarrow$ $۰/۷۵ < A < ۱/۲۵$
- رس فعال یا مونت موریلونیت $\Rightarrow$ $A \ge ۱/۲۵$

در ادامه با حل چند تمرین، مفاهیم مربوط به پارامتر A را بهتر درک می‌کنیم:

تمرین ۱۵: در آزمایش برروی یک خاک رس با دامنه خمیری ۲۸، درصد وزنی ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر، برابر ۱۶ درصد به‌دست آمده است. این خاک رس احتمالاً دارای کانی از نوع ... می‌باشد. (سراسری - ۸۶)

۱) ایلیت ۲) کائولینیت ۳) مونت‌موریلونیت ۴) هالوزیت

حل: ابتدا عدد فعالیت خاک رسی را تعیین می‌کنیم:

$$A = \frac{PI}{\text{درصد وزنی ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون}} = \frac{۲۸}{۱۶} = ۱/۷۵$$

چون $A > ۱/۲۵$ است، بنابراین نوع کانی رسی، مونت موریلونیت است و گزینهٔ (۳) پاسخ صحیح این تست می‌باشد.

تمرین ۱۶: در یک خاک رسی حد روانی دو برابر حد خمیری بوده و درصد وزنی ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون، برابر ۲۰ درصد است. اگر عدد فعالیت این خاک برابر ۱/۵ باشد، در آن‌صورت حد روانی خاک چقدر است؟

۱) ۳۰ ۲) ۴۰ ۳) ۵۰ ۴) ۶۰

حل: ابتدا نشانهٔ خمیری خاک را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

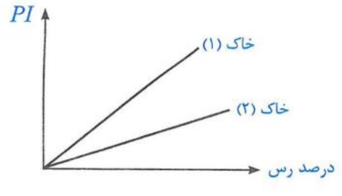
$$A = \frac{PI}{\text{درصد وزنی ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون}} \Rightarrow ۱/۵ = \frac{PI}{۲۰} \Rightarrow PI = ۳۰$$

و در ادامه با توجه به اطلاعات صورت سؤال، خواهیم داشت:

$$PI = LL - PL \Rightarrow ۳۰ = ۲PL - PL \Rightarrow PL = ۳۰$$
$$LL = ۲PL = ۲ \times ۳۰ = ۶۰$$

بنابراین گزینه (۴) درست است.

تمرین ۱۷: نمودار نشانهٔ خمیری در برابر درصد رس، برای دو خاک (۱) و (۲) مطابق شکل روبرو است. کدام گزینه مقایسه درستی را در مورد فعالیت این دو خاک بیان می‌کند؟



۱) خاک (۱) از (۲) فعال‌تر است زیرا احتمالاً دارای مقادیر بیشتری کائولینیت است.
۲) خاک (۲) از (۱) فعال‌تر است زیرا احتمالاً دارای مقادیر بیشتری مونت موریلونیت است.
۳) خاک (۱) از (۲) فعال‌تر است زیرا احتمالاً دارای مقادیر بیشتری مونت موریلونیت است.
۴) خاک (۲) از (۱) فعال‌تر است زیرا احتمالاً دارای مقادیر بیشتری کائولینیت است.

حل: می‌دانیم شیب نمودار (درصد رس - PI) برای یک خاک، نشانگر فعالیت خاک است و چون شیب نمودار مربوط به خاک (۱) بیشتر از شیب نمودار مربوط به خاک (۲) است، بنابراین خاک (۱) از (۲) فعال‌تر است. علت فعالیت بیشتر یک خاک را بایستی در نوع کانی‌های آن دانست. از این‌رو با توجه به گزینه‌ها می‌توان حدس زد که خاک (۱) دارای مقادیر بیشتری مونت موریلونیت (کانی رسی با فعالیت بالا) است، یعنی گزینه (۳) پاسخ صحیح است.

B-۳- کاربرد مفاهیم حدود اتربرگ در مسائل وزنی و حجمی

در برخی از مسائل و تست‌ها، مفاهیم خوانده شده در بحث حدود اتربرگ را با فرمول‌های وزنی و حجمی در فصل اول ترکیب می‌کنند و مسائل مفهومی و جالبی طرح می‌گردد. در ادامه می‌خواهیم با حل چند تمرین، شما را با این نوع مسائل آشنا کنیم:

تمرین ۱۸: برای یک نمونه خاک با مشخصات زیر کدام‌یک از عبارات زیر صحیح است؟ (سراسری - ۸۷ و ۸۹)

$\gamma_{sat} = 2\ gr/cm^3 \quad , \quad G_s = 2/50 \quad , \quad PI = 5 \quad , \quad PL = 10$

۱) این خاک در درصد رطوبت اشباع مشکلی ازنظر مقاومت ندارد و پایدار می‌ماند.
۲) این خاک قبل از اشباع شدن مقاومت خود را به‌طور کامل ازدست می‌دهد و ناپایدار می‌گردد.
۳) این خاک قبل از اشباع شدن مقاومت خود را به‌طور کامل ازدست می‌دهد و سپس با رسیدن رطوبت به مقدار رطوبت اشباع دوباره پایدار می‌گردد.
۴) اطلاعات برای اظهارنظر کافی نمی‌باشد.

● حل: در خاک‌های چسبنده، خاک در حد روانی مقاومت خود را به‌طور کامل از دست می‌دهد و به شکل مایع، روان می‌شود. پس در ابتدای پاسخگویی به این سؤال لازم است تا حد روانی را محاسبه کرده و سپس رطوبت اشباع را (که در گزینه‌ها مورد سؤال قرار گرفته) به‌دست آوریم تا با مقایسهٔ آن با حد روانی، در مورد مقاومت خاک اظهارنظر نماییم. با توجه به این موضوع می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \gamma_{sat} = \dfrac{G_s + e}{1+e}\gamma_w \Rightarrow 2 = \dfrac{2/5 + e}{1+e} \times 1 \Rightarrow e = 0/5 \\ \omega G_s = S_r\, e \xrightarrow{S_r = 1} \omega_{sat} \times 2/5 = 1 \times 0/5 \Rightarrow \omega_{sat} = 0/2 \quad \text{یا} \quad 20\% \\ PI = LL - PL \Rightarrow LL = PL + PI = 10 + 5 = 15 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \omega_{sat} = 20\% > LL = 15\%$$

بنابراین خاک قبل از اشباع شدن، یعنی قبل از رسیدن به درصد رطوبت ٪۲۰، از درصد رطوبت حد روانی عبور کرده و مقاومت خود را از دست می‌دهد، در نتیجه گزینه (۲) پاسخ صحیح این تست است.

کمی توضیح بیشتر

شاید پس از حل تست فوق این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که مگر ممکن است یک خاک قبل از اشباع شدن به حد روانی برسد و آیا اصولاً امکان دارد حد روانی کوچکتر از حد انقباض ($LL < SL$) باشد؟
در پاسخ به این سؤال باید بگوییم که در خاک‌های ریزدانه (رسی) وقوع این وضعیت غیرممکن بوده و طبق نمودار حدود اتربرگ همواره $SL < LL$ است. پس حالا که چنین موضوعی در این تست (تمرین ۱۸) مطرح شده، به این معنی است که خاک موردنظر حاوی مقدار قابل توجهی درشت‌دانه (از نوع ماسهٔ ریز) بوده که ترتیب حدود اتربرگ را به هم زده‌اند.

تمرین ۱۹: در یک نمونه خاک فوق اشباع با حجم $100\ cm^3$، وزن $180\ gr$ و رطوبت ۵۰ درصد، حدود اتربرگ به شرح زیر می‌باشند:
حد روانی = ۶۰ ، حد خمیری = ۲۰ و حد انقباض = ۱۵

اگر آب نمونه تبخیر شود و رطوبت آن به ۱۰ درصد کاهش یابد ($\omega = 10\%$)، در آن‌صورت میزان کاهش حجم خاک چند cm^3 خواهد بود؟

● حل: ابتدا با در اختیار داشتن وزن و رطوبت خاک، با توجه به مطالب فصل قبل، وزن آب و دانه‌های جامد در حالت اولیه (فوق اشباع) را می‌یابیم (دقت شود که $\omega = 50\%$، در محدودهٔ بین LL و PL است و خاک قطعاً در این رطوبت، فوق اشباع است):

$$W_{\text{کل}} = (1+\omega)W_s \Rightarrow 180 = (1+0/5)\times W_s \Rightarrow W_s = 120\ gr$$

$$W_{w\,\text{اولیه}} = W_{\text{کل}} - W_s = 180 - 120 = 60\ gr \Rightarrow V_{w\,\text{اولیه}} = 60\ cm^3$$ (می‌دانیم حجم ۱ گرم آب برابر $1cm^3$ است)

می‌دانیم با کاهش حجم آب در ناحیهٔ فوق اشباع، حجم خاک نیز به همان میزان کم می‌شود تا سرانجام در حد انقباض، کاهش حجم نمونه متوقف می‌گردد. پس اگر حجم آب در حد انقباض را محاسبه کرده و آن را از حجم کل آب کم کنیم، می‌توانیم میزان کاهش حجم آب تا حد انقباض یا همان کاهش حجم نمونه تا حد انقباض را به‌دست آوریم. با توجه به این موضوع در حل این مسئله خواهیم داشت:

$$\omega_{SL} = \frac{W_{w\,(SL)}}{W_s} \Rightarrow 0/15 = \frac{W_{w\,(SL)}}{120} \Rightarrow W_{w\,(SL)} = 18\ gr \Rightarrow V_{w\,(SL)} = 18\ cm^3$$

$$\Delta V_{\text{خاک}} = \Delta V_w = V_{w\,\text{اولیه}} - V_{w\,(SL)} = 60 - 18 = 42\ cm^3$$

در این سؤال کاهش حجم نمونه تا رطوبت ٪۱۰ خواسته شده است ولی جالب اینجاست که از حد انقباض به بعد، کاهش رطوبت باعث کاهش حجم نمونه نمی‌شود و همین $42\ cm^3$، کاهش حجم نمونه تا رطوبت ٪۱۰ نیز می‌باشد.

بررسی یک نکته پرکاربرد

برای محاسبهٔ حد انقباض می‌توان با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، یکی از روش‌های زیر را انتخاب کرد:

روش اول: در حد انقباض خاک اشباع است، بنابراین با کمک رابطهٔ معروف زیر که در فصل اول یاد گرفتیم، رطوبت خاک در حد انقباض را می‌یابیم:

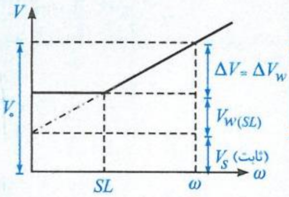
$$\omega\, G_s = S_r\, e \xrightarrow[S_r=۱]{\omega=\omega_{SL}} \omega_{SL} \times G_s = ۱\times e \;\Rightarrow\; \omega_{SL} = \frac{e}{G_s}$$

(e ← نسبت تخلخل خاک در حد انقباض)

روش دوم: روش اول را با فرمول وزن مخصوص خشک خاک ترکیب کرده و می‌نویسیم:

$$\begin{cases}\gamma_d = \dfrac{G_s\,\gamma_w}{۱+e}\\ \omega_{SL}\,G_s = e\end{cases} \Rightarrow \gamma_d = \frac{G_s\,\gamma_w}{۱+\omega_{SL}\,G_s} \Rightarrow \omega_{SL} = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{۱}{G_s}$$

(γ_d ← وزن مخصوص خشک خاک در حد انقباض)



روش سوم: با توجه به نمودار مقابل، مشخص است که حجم آب اولیه ($V_{w_۰}$) شامل حجم آب در حد انقباض ($V_{w\,(SL)}$) و حجم آبی است که باعث تغییر در حجم خاک می‌شود (ΔV)، یعنی:

$$V_{w_۰} = V_{w\,(SL)} + \Delta V \;\Rightarrow\; V_{w\,(SL)} = V_{w_۰} - \Delta V$$

پس اگر ما $V_{w_۰}$ و ΔV را داشته باشیم، به‌راحتی می‌توانیم حجم آب در حد انقباض و سپس وزن آب در حد انقباض را محاسبه کنیم و در نهایت به‌صورت زیر حد انقباض را بیابیم:

$$\omega_{SL} = \frac{W_{w\,(SL)}}{W_s} \;\Rightarrow\; SL = \omega_{SL}\times ۱۰۰$$

(W_s ← وزن خاک پس از خشک شدن در کوره)

دقت شود که نیازی به حفظ کردن این روابط نبوده و تنها مهارت در رسم دیاگرام سه فازی برای تحلیل مسائل مربوط به SL کافیست.

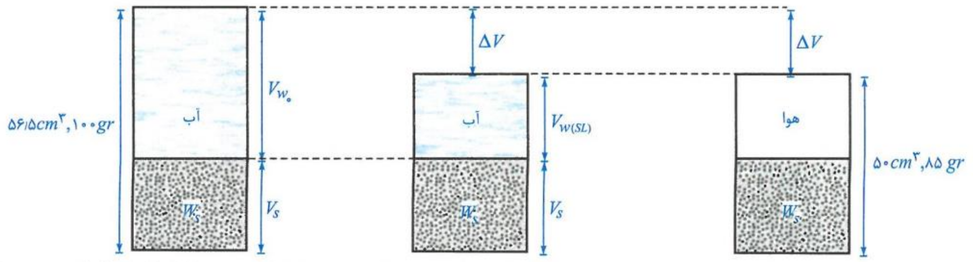
تمرین ۲۰: یک نمونه خاک اشباع دارای حجم $۵۶/۵\,cm^۳$ و وزن ۱۰۰ گرم می‌باشد. اگر خاک را کاملاً خشک کنیم، حجم آن به $۵۰\,cm^۳$ و وزن آن به ۸۵ گرم تقلیل می‌یابند.

الف) حد انقباض خاک چند درصد است؟ (سراسری - ۷۹)

ب) تودهٔ ویژهٔ خاک (G_s) چقدر است؟

پاسخ

الف) با استفاده از مفاهیم روش سوم و با کمک شکل‌های زیر، حد انقباض را محاسبه می‌کنیم:



شکل (۱): وضعیت اولیهٔ خاک فوق اشباع — شکل (۲): وضعیت خاک در حد انقباض — شکل (۳): وضعیت نهایی که خاک خشک شده است.

$$\begin{cases} W_۱ = W_s + W_{w_۰} \Rightarrow ۱۰۰ = ۸۵ + W_{w_۰} \Rightarrow W_{w_۰} = ۱۵\,gr \Rightarrow V_{w_۰} = ۱۵\,cm^۳\\ V_۱ = ۵۶/۵\,cm^۳ \;,\; V_۲ = V_۳ = ۵۰\,cm^۳ \Rightarrow \Delta V = V_۱ - V_۲ = V_۱ - V_۳ = ۵۶/۵ - ۵۰ = ۶/۵\,cm^۳ \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{w_۰} = V_{w\,(SL)} + \Delta V \Rightarrow ۱۵ = V_{w\,(SL)} + ۶/۵ \Rightarrow V_{w\,(SL)} = ۸/۵\,cm^۳ \Rightarrow W_{w\,(SL)} = ۸/۵\,gr$$

$$\omega_{SL} = \frac{W_{w\,(SL)}}{W_s} = \frac{۸/۵}{۸۵} = ۰/۱ \Rightarrow SL = \omega_{SL}\times ۱۰۰ = ۰/۱\times ۱۰۰ = ۱۰٪$$

ب) با توجه به اینکه مقادیر V_{w_0} و V_1 را داریم، به‌سادگی می‌توان V_s را به‌دست آورد:

$$V_1 = V_s + V_{w_0} \Rightarrow 56.5 = V_s + 15 \Rightarrow V_s = 41.5\,cm^3$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_s\,\gamma_w} = \frac{85}{41.5 \times 1} = 2.04$$

تمرین ۲۱: حد روانی خاکی ۴۰ و حد خمیری آن ۳۰ می‌باشد. اگر فرض شود حد انقباض آن دوبرابر دامنه خمیری باشد و $G_s = 2.7$ درنظر گرفته شود، وزن مخصوص خاک در رطوبت برابر حد انقباض را برحسب kN/m^3 تعیین نمایید. ($\gamma_w = 10\,kN/m^3$) (سراسری - ۸۶)

۱) ۱۸ ۲) ۱۹ ۳) ۲۰ ۴) ۲۱

● حل: ابتدا نسبت تخلخل خاک را در رطوبت حد انقباض (که $S_r = 1$ است) می‌یابیم:

$$\begin{cases} S_r^{\,1}\, e = G_s\,\omega_{SL} \Rightarrow \omega_{SL} = \dfrac{e}{G_s} \\ \text{طبق صورت سؤال} : SL = 2PI = 2\times(LL - PL) = 2\times(40-30) = 20 \quad \text{یا} \quad \omega_{SL} = 0.2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow 0.2 = \frac{e}{2.7} \Rightarrow e = 0.54$$

در ادامه با توجه به اشباع بودن خاک در حد انقباض، وزن مخصوص خاک در این رطوبت برابر خواهد بود با:

$$\gamma = \gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \frac{2.7 + 0.54}{1 + 0.54} \times 10 \simeq 21\,kN/m^3$$

بنابراین گزینهٔ (۴) پاسخ صحیح است.

تذکر: مجدداً تأکید می‌شود که نکته کلیدی در حل مسائل حد انقباض آن است که بدانیم خاک در حد انقباض در نقطهٔ اشباع قرار دارد.

سیستم طبقه‌بندی یا همان نام‌گذاری خاک عبارت است از مرتب کردن خاک‌های مختلف با خواص مشابه به گروه‌ها و زیر گروه‌هایی بر حسب کاربردشان. در حالت کلی طبقه‌بندی خاک بر دو نوع است:

۱) **طبقه‌بندی بافت خاک:** در این طبقه‌بندی ملاک ما حدود اندازهٔ ذرات خاک است و ابتدا نام گروه اصلی و بعد نام گروه فرعی به‌صورت صفت ذکر می‌گردد، مثل رس لای‌دار یا رس ماسه‌دار و غیره. طبقه‌بندی سیستم *USDA* که در کشاورزی کاربرد دارد، از این نوع است.

۲) **طبقه‌بندی خاک‌ها برحسب مورد استفاده‌شان:** در این نوع طبقه‌بندی، علاوه بر حدود اندازهٔ ذرات خاک، شناخت خصوصیات خمیری خاک هم مورد نظر است. طبقه‌بندی سیستم‌های **آشتو** (*AASHTO*) و **متحد** یا همان **یونیفاید** (*USCS*) از این دسته هستند.

از آنجایی‌که سیستم آشتو مربوط به راهسازی و سیستم متحد مربوط به ژئوتکنیک (مکانیک خاک) است، بنابراین در ادامهٔ بحث خود به بررسی سیستم متحد می‌پردازیم و به سیستم آشتو نیز در قسمت تکمیلی اشارهٔ مختصری خواهیم داشت. در ضمن از بررسی سیستم *USDA* که مربوط به کشاورزی می‌باشد، در این کتاب صرف‌نظر می‌کنیم.

C-۱- نام‌گذاری خاک‌های غیرآلی در سیستم متحد

به‌طور کلی در سیستم طبقه‌بندی متحد نام خاک از دو قسمت و یا بهتر بگوییم از دو حرف تشکیل می‌شود. حرف اول بیانگر نوع خاک با توجه به اندازهٔ آن می‌باشد و برای خاک‌های غیرآلی، به شرح زیر است:

G: شن (*Gravel*) ، ***S***: ماسه (*Sand*) ، ***M***: لای یا سیلت (*Mud*)، ***C***: رس (*Clay*)

حرف دوم نیز صفتی برای حرف اول می‌باشد و در مورد علائم به‌کار رفته برای آن، در ادامهٔ بحث صحبت خواهیم کرد.

شکل کلی نام خاک در سیستم متحد : | حرف اول | حرف دوم |

در ادامه با چگونگی نام‌گذاری خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد آشنا می‌شویم که برای انجام آن دو قدم زیر را طی می‌کنیم:

قدم اول: تشخیص ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک

قدم دوم: تعیین نام خاک که برای خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه با دو رویکرد مختلف انجام می‌شود.

تشخیص ریزدانه و درشت‌دانه بودن خاک در قدم اول

نام‌گذاری خاک در سیستم متحد در اولین قدم با تفکیک ریزدانه و درشت‌دانه از هم آغاز می‌شود. همانطور که در ابتدای فصل یاد گرفتیم، الک شمارهٔ ۲۰۰ (قطر $0/075\,mm$) مرز جدایی ریزدانه و درشت‌دانه است، به این ترتیب که ذرات عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰، ریزدانه و ذرات بالای این الک، درشت‌دانه هستند. در سیستم متحد اگر مقدار ریزدانه یا همان درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ بزرگتر یا مساوی ۵۰٪ باشد، خاک ریزدانه به حساب می‌آید و حرف اول آن C یا M خواهد بود (قسمت اولِ نام خاک رس یا لای است) ولی چنانچه درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ کمتر از ۵۰٪ باشد، خاک درشت‌دانه بوده و حرف اول آن به صورت G یا S خواهد بود (قسمت اولِ نام خاک شن یا ماسه است).

$F_{200} \geq 50\% \Rightarrow$ وزن ریزدانه بیشتر یا مساوی وزن درشت‌دانه است. $\Rightarrow$ حرف اول C یا M

$F_{200} < 50\% \Rightarrow$ وزن درشت‌دانه بیشتر از ریزدانه است. $\Rightarrow$ حرف اول G یا S

قسمت سوم (نام‌گذاری خاک‌ها)

زیر شاخه‌های قسمت سوم

C-۱- نام‌گذاری خاک‌های غیرآلی در سیستم متحد

C-۲- نام‌گذاری خاک‌های آلی در سیستم متحد

جالب است بدانید که برخی از تست‌های کنکور، فقط با تشخیص ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک قابل حل می‌باشند. به تست‌های زیر توجه کنید:

تمرین ۴۲: نتیجه آزمایش دانه‌بندی برروی نمونهٔ خاکی نشان داده است که ۱۶ درصد آن از الک نمرهٔ ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلی‌متر) و ۷۷ درصد آن از الک نمرهٔ ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) می‌گذرد. حد خمیری و حد روانی بخش ریزدانهٔ این خاک به‌ترتیب ۱۲ و ۳۰ می‌باشد. در سیستم طبقه‌بندی متحد نام این خاک چه می‌باشد؟ (سراسری - ۷۸ و ۸۰)

۱) SC ۲) ML ۳) CH ۴) CL

● ابتدا باید F_{200} را بیابیم که با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، خواهیم داشت:

$F_{200} = 16\% < 50\%$ $\Rightarrow$ قسمت اول نام خاک G یا S است. $\Rightarrow$ فقط گزینهٔ (۱) می‌تواند درست باشد.

در ادامهٔ درس خواهیم دید که چگونه در قدم دوم نام کامل خاک تعیین می‌گردد.

تمرین ۴۳: در یک نمونه خاک، دانه‌های ریزتر از ۴/۷۵ میلیمتر، بیش از ۵۰ درصد، دانه‌های درشت‌تر از الک شمارهٔ ۲۰۰ کمتر از ۵۰ درصد و دانه‌های بین ۲ میلیمتر و ۴/۷۵ میلیمتر، ۲۵ درصد کل دانه‌هاست. اگر حدود اتربرگ بخش ریزدانه آن ۴۰ = LL و ۲۰ = PL باشد، در آن‌صورت نام خاک در سیستم نامگذاری متحد (*unified*) کدام است؟ (سراسری - ۷۵)

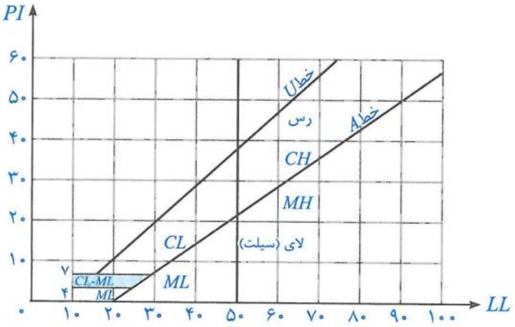
۱) GC یا SC ۲) $GC - GP$ ۳) ML یا CL ۴) SC یا SM

● ابتدا باید درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ را تعیین کنیم. چون درصد دانه‌های درشت‌تر از الک شمارهٔ ۲۰۰ (که از الک شمارهٔ ۲۰۰ عبور نکرده‌اند) کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد، بنابراین درصد دانه‌های ریزتر از الک شمارهٔ ۲۰۰ (همان F_{200}) بیشتر از (یا مساوی) ۵۰ درصد بوده ($F_{200} \geq 50\%$) و خاک ریزدانه است (حرف اول خاک C یا M است). در بین گزینه‌های این تست فقط گزینهٔ (۳) است که حرف اول آن C یا M بوده و جواب این تست است.

نام‌گذاری خاک ریزدانه در قدم دوم

همانطورکه گفتیم اگر F_{200} بزرگتر یا مساوی ٪۵۰ باشد، خاک ریزدانه بوده و حرف اول آن به‌صورت C یا M خواهد بود. در این صورت برای نام‌گذاری خاک ریزدانه، دو گام زیر باید طی شود:

گام اول: ابتدا بایستی حرف اول خاک ریزدانه را مشخص کنیم. برای این منظور (تشخیص C یا M بودن خاک) از نمودار خمیری کاساگرانده استفاده می‌شود که در شکل مقابل نمایش داده شده است:



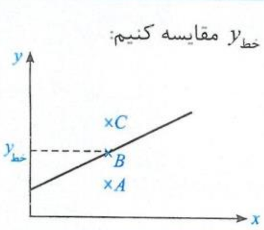
در نمودار بالا، **خط تجربی A با معادله $PI = 0/73\,(LL - 20)$**، مرز جدایی لای و رس می‌باشد **(معادلهٔ خط A را باید به‌خاطر بسپارید)**. خط U نیز با معادله $PI = 0/9\,(LL - 8)$ حد بالایی این نمودار را نشان می‌دهد و بالای آن عملاً خاکی وجود ندارد. حال ممکن است از خود بپرسید که از این نمودار چگونه استفاده می‌شود؟

برای استفاده از این نمودار باید از مشخصات خمیری خاک (یعنی LL و PL خاک موجود) کمک گرفته و ابتدا PI خاک را محاسبه کنید. سپس در ادامهٔ کار موقعیت خاک را نسبت به خط A مشخص کرده و C یا M بودن خاک را تعیین می‌کنیم.

قبل از اجرای گام اول توصیه می‌کنیم تا به یادآوری زیر توجه کنید:

یادآوری

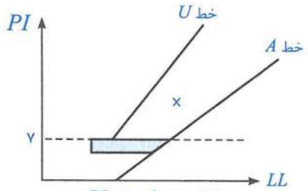
برای آنکه بفهمیم یک نقطه در زیر یک خط، روی یک خط یا بالای یک خط قرار دارد، کافیست $y_{\text{نقطه}}$ را با $y_{\text{خط}}$ مقایسه کنیم:



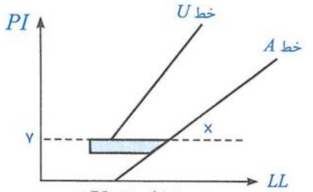
- $y_A < y_{\text{خط}} \Rightarrow$ A در زیر خط قرار دارد.
- $y_B = y_{\text{خط}} \Rightarrow$ B در روی خط قرار دارد.
- $y_C > y_{\text{خط}} \Rightarrow$ C در بالای خط قرار دارد.

حالا حالت‌های ممکن برای تعیین موقعیت یک خاک در نمودار خمیری کاساگرانده را بررسی می‌کنیم. توجه کنید که ما در بررسی‌های خود، PI موجود خاک (یعنی تفاضل LL و PL) را با PI خط A یعنی $(LL - ۲۰)$ ۰/۷۳ مقایسه می‌کنیم.

حالت ۱: اگر $PI > ۷$ باشد، نوع خاکِ ریزدانه به‌صورت زیر تعیین می‌شود:



(بالای خط A ، $PI > ۷$)

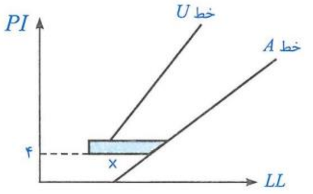


(زیر خط A ، $PI > ۷$)

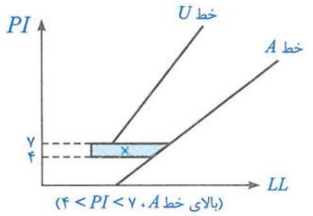
خاک زیر خط A است و M می‌باشد. $\Rightarrow$ $PI_{موجود} < PI_A$

خاک بالای خط A است و C می‌باشد. $\Rightarrow$ $PI_{موجود} > PI_A$

حالت ۲: اگر $PI < ۴$ باشد، خاک در ناحیه M (لای) قرار دارد و نیازی به کنترل موقعیت آن نسبت به خط A نیست.

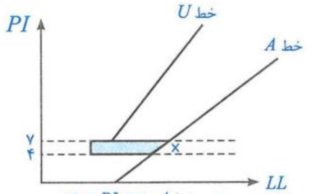


حالت ۳: اگر $۴ < PI < ۷$ باشد، نوع خاک ریزدانه مثل حالت (۱) بستگی به موقعیتش نسبت به خط A دارد، به این ترتیب که:



(بالای خط A ، $۴ < PI < ۷$)

خاک بالای خط A است و در ناحیهٔ آبی رنگ قرار می‌گیرد و اسم آن به‌صورت $C - M$ خواهد بود. $\Rightarrow$ $PI_{موجود} > PI_A$



(زیر خط A ، $۴ < PI < ۷$)

خاک زیر خط A است و نام آن M می‌باشد. $\Rightarrow$ $PI_{موجود} < PI_A$

گام دوم: در نهایت پس از آنکه حرف اول خاک مشخص شد، برای تعیین حرف دوم به حد روانی خاک نگاه می‌کنیم. اگر $LL > ۵۰$ باشد حد روانی آن بالا به حساب می‌آید و از حرف **H** $(High)$ استفاده می‌شود ولی اگر $LL \leq ۵۰$ باشد، در آن‌صورت حد روانی خاک پایین بوده و باید از حرف **L** (Low) در تکمیل نام‌گذاری استفاده کنیم.

برای درک بهتر نام‌گذاری خاک‌های ریزدانه، به دو تمرینی که در ادامه مطرح می‌شوند، توجه کنید.

تمرین ۲۴: برای یک نمونه خاک ریزدانه در آزمایشگاه پارامترهای زیر به‌دست آمده است: (سراسری - ۸۶)

$PI = ۰/۷۳(LL - ۲۰)$, $LL = ۶۰$, $PL = ۵۰$

این خاک در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید ... است.

۱) CH ۲) CL ۳) ML ۴) MH

● **حل:** همانطورکه می‌بینید در صورت سؤال اشاره شده است که خاک ریزدانه می‌باشد. در ادامه ابتدا حرف اول این خاک ریزدانه را مشخص می‌کنیم:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۶۰ - ۵۰ = ۱۰ > ۷ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳ \times (۶۰ - ۲۰) = ۲۹/۲ \end{cases}$$

$\Rightarrow PI_{\text{موجود}} < PI_A \Rightarrow$ خاک زیر خط A است و حرف اول آن M می‌باشد.

در نهایت با تعیین حرف دوم، نام خاک را تکمیل می‌کنیم:

$LL = ۶۰ > ۵۰ \Rightarrow$ حرف دوم خاک H است.

بنابراین نام کامل خاک $\boxed{MH}$ است (یعنی خاک سیلیت با خاصیت خمیری زیاد) و گزینهٔ (۴) درست است.

تمرین ۲۵: با توجه به اطلاعات روبرو، نام خاک در طبقه‌بندی متحد کدام است؟ $PL = ۲۵\%$ ، $LL = ۷۰\%$ ، $F_{۲۰۰} = ۶۵\%$ ، $F_۴ = ۸۰\%$

● **حل:** در قدم اول، درشت‌دانه یا ریزدانه بودن خاک را مشخص می‌کنیم:

$F_{۲۰۰} = ۶۵\% > ۵۰\% \Rightarrow$ خاک ریزدانه است. $\Rightarrow$ حرف اول M یا C است.

حالا که مشخص شد خاک ریزدانه است، ابتدا حرف اول آن را به‌صورت زیر تعیین می‌کنیم:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۷۰ - ۲۵ = ۴۵ > ۷ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳ \times (۷۰ - ۲۰) = ۳۶/۵ \end{cases} \Rightarrow PI_{\text{موجود}} > PI_A \Rightarrow$$ خاک بالای خط A است و C می‌باشد.

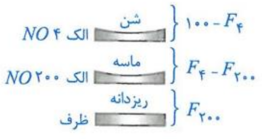
از سوی دیگر حرف دوم خاک نیز H می‌باشد، زیرا: $LL = ۷۰ > ۵۰ \Rightarrow$ حرف دوم H است.

پس نام کامل خاک $\boxed{CH}$ (یعنی خاک رس با خاصیت خمیری زیاد) است.

نام‌گذاری خاک درشت‌دانه در قدم دوم

همانطورکه مشاهده کردید، اگر $F_{۲۰۰}$ در یک خاک کوچکتر از ۵۰٪ باشد، خاک موردنظر درشت‌دانه بوده و حرف اول آن به‌صورت G یا S خواهد بود. در سیستم طبقه‌بندی متحد برای نام‌گذاری خاک درشت‌دانه، دو گام زیر طی می‌شود:

گام اول: ابتدا درصد ماسه و شن را به‌دست آورده و آنها را با هم مقایسه می‌کنیم، هر کدام که بیشتر بود، حرف اول خاک براساس آن نوشته می‌شود. به بیان ساده‌تر می‌توان نوشت:



$$\begin{cases} ۱۰۰ - F_۴ > F_۴ - F_{۲۰۰} \Rightarrow \text{شن بیشتر از ماسه است و حرف اول خاک } G \text{ خواهد بود.} \\ ۱۰۰ - F_۴ \le F_۴ - F_{۲۰۰} \Rightarrow \text{ماسه بیشتر یا مساوی با شن است و حرف اول خاک } S \text{ خواهد بود.} \end{cases}$$

گام دوم: پس از تعیین حرف اول خاک درشت‌دانه، برای مشخص کردن حرف دوم به درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ نگاه می‌کنیم که یکی از سه حالت زیر ممکن است رخ دهد:

حالت ۱: اگر $F_{۲۰۰} < ۵\%$ باشد، یعنی خاک موردنظر، ریزدانه خیلی کمی دارد و ما می‌توانیم از آن صرف‌نظر کنیم (ریزدانه در نام‌گذاری خاک نقشی ندارد). در این شرایط حرف دوم خاک بر مبنای کیفیت دانه‌بندی خاک و با کمک پارامترهای C_c و C_u تعیین می‌گردد، به این ترتیب که اگر C_c و C_u در محدوده‌های قابل قبولی که قبلاً گفتیم باشند، خاک خوب دانه‌بندی شده به حساب می‌آید و حرف دوم آن **W** (*Well Graded*) خواهد بود، در غیر این‌صورت خاک بد دانه‌بندی شده است و حرف دوم آن **P** (*Poorly Graded*) می‌باشد.

$$\begin{cases} C_u \ge ۶ \;,\; ۱ \le C_c \le ۳ : \text{شرط خوب دانه‌بندی شدن ماسه} \\ C_u \ge ۴ \;,\; ۱ \le C_c \le ۳ : \text{شرط خوب دانه‌بندی شدن شن} \end{cases}$$

حالت ۲: اگر $F_{۲۰۰} > ۱۲\%$ باشد، یعنی خاک موردنظر مقدار قابل توجهی ریزدانه دارد و باید این ریزدانه در نام‌گذاری خاک نقش داشته باشد. در این حالت حرف دوم خاک به‌صورت **C** یا **M** خواهد بود. لازم به ذکر است که تشخیص C یا M بودن خاک براساس نمودار خمیری کاساگرانده (گام اول نام‌گذاری خاک ریزدانه) می‌باشد. توجه کنید که در این حالت پارامترهای C_u و C_c در نام‌گذاری خاک درشت‌دانه نقشی ندارد.

حالت ۳: اگر $۵\% \le F_{۲۰۰} \le ۱۲\%$ باشد، حرف دوم خاک ترکیبی از دو حالت قبلی خواهد بود که به این خاک‌ها، **خاک‌های حد فاصل** یا دو اسمی گفته می‌شود، مثل $SP - SC$ یا $SW - SM$ و ... .

تذکر: در برخی مواقع (بعضی از کتاب‌ها و سؤالات) به اشتباه $F_{۲۰۰} = ۵\%$ را مربوط به حالت (۱) و $F_{۲۰۰} = ۱۲\%$ را مربوط به حالت (۲) می‌دانند که البته این موضوع با دستورالعمل نامگذاری خاک در سیستم متحد مغایرت دارد.

در ادامه با حل چند تمرین بر روی مطالب این قسمت مسلط‌تر می‌شویم:

تمرین ۴۶: در یک آزمایش دانه‌بندی، درصد عبوری از الک‌های شمارهٔ ۴ و ۲۰۰ به‌ترتیب برابر ۶۵ و ۱۵ درصد است. اگر حد خمیری و حد روانی بخش ریزدانهٔ این خاک به‌ترتیب ۱۸ و ۲۰ درصد باشند، نام خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد ($USCS$) چیست؟ ($C_c = ۴$ ، $C_u = ۵$)

● حل: در قدم اول ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک را کنترل می‌کنیم:

$F_{۲۰۰} = ۱۵\% < ۵۰\% \Rightarrow$ خاک درشت‌دانه است و حرف اول آن S یا G می‌باشد.

در ادامه برای به‌دست آوردن نام این خاکِ درشت‌دانه، می‌نویسیم:

$$\begin{cases} \text{درصد شن} = ۱۰۰ - F_۴ = ۱۰۰ - ۶۵ = ۳۵\% \\ \text{درصد ماسه} = F_۴ - F_{۲۰۰} = ۶۵ - ۱۵ = ۵۰\% \end{cases} \Rightarrow \text{درصد شن} < \text{درصد ماسه} \Rightarrow$$ حرف اول خاک S است

برای تعیین حرف دوم نیز خواهیم داشت: $F_{۲۰۰} = ۱۵\% > ۱۲\%$

در این حالت پارامترهای C_u و C_c نقشی در نام‌گذاری نداشته و نوع ریزدانه حرف دوم خاک را تعیین می‌کند (حرف دوم M یا C است)، بنابراین خواهیم داشت:

$PI = LL - PL = ۲۰ - ۱۸ = ۲ < ۴ \Rightarrow$ با توجه به مطالب قسمت ریزدانه‌ها، حرف دوم M است.

پس نام کامل خاک $\boxed{SM}$ می‌باشد (یعنی ماسه‌ای که لای زیاد دارد).

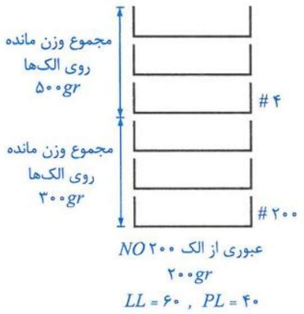
تمرین ۴۷: اطلاعات آزمایش دانه‌بندی نوعی خاک مطابق شکل زیر می‌باشد. نوع خاک براساس روش متحد کدام است؟ (سراسری - ۹۲)

۱) SC

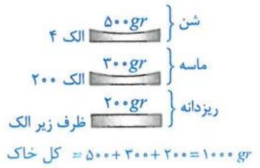
۲) SM

۳) GM

۴) GC



● حل: با ترسیم مجدد الک‌ها، وزن شن، ماسه و ریزدانهٔ خاک را به‌صورت زیر مشخص می‌کنیم (کل خاک $۱۰۰۰gr$ است) و سپس درصد هر کدام را می‌یابیم:



$$\begin{cases} \text{درصد شن} = \frac{۵۰۰}{۱۰۰۰} \times ۱۰۰ = ۵۰\% \\ \text{درصد ماسه} = \frac{۳۰۰}{۱۰۰۰} \times ۱۰۰ = ۳۰\% \\ \text{درصد ریزدانه} = \frac{۲۰۰}{۱۰۰۰} \times ۱۰۰ = ۲۰\% \end{cases}$$

در ادامه برای نام‌گذاری خاک، در قدم اول ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک را تشخیص می‌دهیم:

$\text{درصد ریزدانه} = F_{۲۰۰} = ۲۰\% < ۵۰\% \Rightarrow$ خاک درشت‌دانه بوده و حرف اول G یا S است.

حال برای نام‌گذاری این خاک درشت‌دانه، گام‌های گفته شده را طی می‌کنیم:

گام اول: $\text{درصد شن} = ۵۰\% > \text{درصد ماسه} = ۳۰\% \Rightarrow$ حرف اول G است.

گام دوم: $\text{درصد ریزدانه} = F_{۲۰۰} = ۲۰\% > ۱۲\% \Rightarrow$ c_u و c_c در نام‌گذاری تأثیری ندارد و حرف دوم C یا M است.

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۶۰ - ۴۰ = ۲۰ \\ PI_A = ۰/۷۳\,(LL - ۲۰) = ۰/۷۳\,(۶۰ - ۲۰) = ۲۹/۲ \end{cases} \Rightarrow PI_{\text{موجود}} < PI_A \Rightarrow$$ خاک زیر خط A است و حرف دوم M است

پس نام کامل خاک $\boxed{GM}$ است (یعنی شنی که لای زیاد دارد) و گزینهٔ (۳) درست می‌باشد.

تمرین ۲۸: چنانچه بخواهیم خاک موجود در تمرین قبل یک خاک حد فاصل شود، در آن‌صورت:

الف) حداقل چند گرم خاک ریزدانه بایستی از مجموعه کم کنیم؟

ب) حداقل چند گرم خاک ماسه‌ای باید به مجموعه اضافه نماییم؟

حل: در وضعیت موجود، ۲۰۰ گرم خاک ریزدانه داریم که ۲۰ درصد کل خاک را تشکیل می‌دهد. بنابراین $F_{۲۰۰} = ۲۰\%$ بوده و خاک مورد نظر، یک اسمی است. حال اگر بخواهیم خاک را به یک خاک دو اسمی یا حد فاصل تبدیل کنیم، بایستی $F_{۲۰۰}$ را کاهش داده و آن را به $F_{۲۰۰} = ۱۲\%$ برسانیم. برای اینکار دو راه وجود دارد:

الف) کاهش مقدار ریزدانه در خاک:

$$F_{۲۰۰} \le ۱۲\% \Rightarrow \left(\frac{۲۰۰-x}{۱۰۰۰-x}\right)\times ۱۰۰ \le ۱۲ \Rightarrow x \ge ۹۰/۹\ gr$$

$F_{۲۰۰}$ ← $\frac{\text{وزن ریزدانه}}{\text{وزن کل خاک}}\times ۱۰۰$

پس حداقل بایستی ۹۱ ≃ ۹۰/۹ گرم از خاک ریزدانه کم کنیم تا خاک مجموعه به‌صورت دو اسمی شود.

ب) افزایش مقدار درشت‌دانه (مثلاً ماسه) به خاک:

$$F_{۲۰۰} \le ۱۲\% \Rightarrow \left(\frac{۲۰۰}{۱۰۰۰+x}\right)\times ۱۰۰ \le ۱۲ \Rightarrow x \ge ۶۶۶/۷\ gr$$

$F_{۲۰۰}$ ← $\frac{\text{وزن ریزدانه}}{\text{وزن کل خاک}}\times ۱۰۰$

پس حداقل بایستی ۶۶۷ ≃ ۶۶۶/۷ گرم خاک ماسه‌ای به خاک مجموعه اضافه کنیم تا دو اسمی شود.

تمرین ۲۹: نتایج آزمایش دانه‌بندی برای دو نمونه خاک A و B مطابق جدول است. در صورتی که خاک C با نسبت وزنی مساوی از خاک A و B تهیه گردد، وضعیت خاک C عبارت است از: (سراسری - ۸۷ و ۸۹)

اندازه الک (mm)	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۶	۱	۲	۴
درصد وزنی عبوری خاک A	۶	۱۲	۲۶	۴۰	۴۸	۶۵	۱۰۰
درصد وزنی عبوری خاک B	۲	۸	۱۴	۲۰	۳۲	۵۵	۱۰۰

۱) خاک درشت دانه با دانه‌بندی خوب
۲) خاک حد فاصل با دانه‌بندی بد
۳) خاک درشت دانه با دانه‌بندی بد
۴) خاک حد فاصل با دانه‌بندی خوب

حل: چون خاک C به نسبت وزنی مساوی از خاک‌های A و B تهیه شده است، بنابراین برای پیدا کردن درصد عبوری از هر الک کافی است تا میانگین درصد وزنی عبوری خاک‌های A و B از آن الک را به‌دست آوریم:

اندازه الک (mm)	درصد وزنی عبوری خاک A	درصد وزنی عبوری خاک B	درصد وزنی عبوری خاک C
۰/۱	۶	۲	$\frac{۲+۶}{۲}=۴$
۰/۲	۱۲	۸	$\frac{۱۲+۸}{۲}=۱۰$
۰/۳	۲۶	۱۴	$\frac{۲۶+۱۴}{۲}=۲۰$
۰/۶	۴۰	۲۰	$\frac{۴۰+۲۰}{۲}=۳۰$
۱	۴۸	۳۲	$\frac{۴۸+۳۲}{۲}=۴۰$
۲	۶۵	۵۵	$\frac{۶۵+۵۵}{۲}=۶۰$
۴	۱۰۰	۱۰۰	$\frac{۱۰۰+۱۰۰}{۲}=۱۰۰$

باتوجه به این‌که درصد عبوری خاک C از الک با قطر mm ۰/۱ ناچیز است (۴٪)، درصد عبوری آن از الک شمارهٔ ۲۰۰ با قطر mm ۰/۰۷۵ نیز ناچیز بوده و به همین جهت خاک C درشت‌دانه محسوب می‌شود. درصد عبوری این خاک از الک با قطر mm ۴ و به تبع آن از الک شمارهٔ ۴ با قطر mm ۴/۷۵ (الک نمره ۴ که مرز ماسه و شن است) برابر ۱۰۰ درصد است، پس این خاکِ درشت‌دانه، ماسه‌ای است.

حال برای مشخص شدن کیفیت دانه‌بندی از پارامترهای C_c و C_u کمک می‌گیریم. با توجه به جدول صفحهٔ قبل ۱۰٪ دانه‌ها از الک با قطر mm ۰/۲ عبور کرده‌اند ($D_{10} = 0/2\ mm$) و به طریق مشابه ۳۰٪ دانه‌ها از الک با قطر mm ۰/۶ و ۶۰٪ درصد دانه‌ها نیز از الک با قطر mm ۲ عبور کرده‌اند ($D_{60} = 2\ mm\ ,\ D_{30} = 0/6\ mm$). پس می‌نویسیم:

$$\begin{cases} C_u = \dfrac{D_{60}}{D_{10}} = \dfrac{2}{0/2} = 10 > 6 \quad \text{(قابل قبول)} \\ C_c = \dfrac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \dfrac{0/6^2}{0/2 \times 2} = \dfrac{0/36}{0/4} = 0/9 < 1 \quad \text{(غیرقابل قبول)} \end{cases}$$

برای اینکه خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده باشد، بایستی $C_u \geq 6$ و $1 \leq C_c \leq 3$ باشد که چون شرط $1 \leq C_c \leq 3$ ارضا نمی‌شود، بنابراین خاک موردنظر بد دانه‌بندی شده است. بنابراین گزینه (۳) پاسخ درست این تست است.

تذکر: دقت شود که این نام کامل این خاک $\boxed{SP}$ است.

C-۲- نام‌گذاری خاک‌های آلی در سیستم متحد

در بعضی از خاک‌ها به‌خصوص ریزدانه‌ها، بقایای تجزیه شدهٔ گیاهان وجود دارد که سبب می‌شود تا اولاً رنگ و بوی خاک تغییر کند (رنگ خاکستری مایل به سیاه و بوی نامطبوع مشاهده می‌شود)، ثانیاً از مقاومت خاک به طرز چشمگیری کاسته شود. این خاک‌ها را **خاک‌های کاملاً آلی گیاهی** یا **خاک برگ** می‌نامند و با **Pt** (مخفف *Peat* به معنی خاک برگ) نشان می‌دهند.

همچنین ممکن است خاکی هم قطر با ریزدانه داشته باشید که آب هم جذب می‌کند، ولی خاک رس نیست. احتمالاً این سؤال در ذهن شما ایجاد شده است که مگر چنین چیزی ممکن است؟ در جواب باید بگوییم بله، خاک موردنظر یک **خاک آلی** است که آن را با حرف ***O*** (*Organic*) نشان می‌دهیم و بر خلاف خاک برگ (که در کشاورزی استفاده می‌شود)، از ظاهرش قابل تشخیص نیست.

سیستم متحد برای نام‌گذاری خاک‌های آلی و تشخیص آنها از ریزدانه‌ها، دستورالعمل زیر را ارائه می‌کند:

$$\left[\frac{\text{حد روانی خاک خشک شده در کوره}}{\text{حد روانی خاک مرطوب}}\right] \begin{cases} \geq 0/75 \ \Rightarrow \ C \text{ یا } M \\ < 0/75 \ \Rightarrow \ O \begin{cases} LL \leq 50 \ \Rightarrow \ OL \\ LL > 50 \ \Rightarrow \ OH \end{cases} \end{cases}$$

توجه کنید که در دستورالعمل فوق، برای تعیین حرف دومِ نام خاک آلی (H یا L)، باید LL خاک مرطوب (قبل از خشک شدن در کوره) را مدنظر قرار دهیم.

تذکر ۱: اگر در یک سؤالِ مربوط به نام‌گذاری خاک، اطلاعات صورت سؤال به کاهش حد روانی خاک در اثر خشک شدن آن اشاره کند، بایستی با دستورالعمل فوق، آلی بودن خاک کنترل گردد.

تذکر ۲: علت کاهش حد روانی خاک آلی در اثر خشک شدن در کوره، این است که وقتی خاک را در کوره خشک می‌کنیم، مواد آلی آن که جاذب آب هستند عملاً می‌سوزند.

تمرین ۳۰: دانه‌بندی خاکی نشان داده است که تنها ۳۰ درصد دانه‌های جامد آن دارای اندازه‌ای بزرگتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر می‌باشند. برروی بخش ریزدانه این خاک آزمایش حد روانی انجام می‌شود و $LL = 40$ بدست می‌آید. بار دیگر پس از خشک کردن نمونه در کوره، آزمایش حد روانی را تکرار می‌کنیم که در این حالت حاصل آزمایش $LL = 25$ است. نام خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد چیست؟

● **حل:** چون حد روانی خاک در اثر خشک شدن در کوره تغییر کرده است، پس احتمال دارد خاک موردنظر آلی باشد، از این رو دستورالعمل تشخیص خاک آلی توسط سیستم متحد را به‌کار می‌بریم:

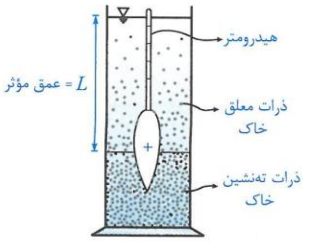
$$\frac{LL \text{ خاک خشک شده در کوره}}{LL \text{ خاک مرطوب}} = \frac{25}{40} = 0/625 < 0/75 \ \Rightarrow \ \text{خاک آلی است و حرف اول } O \text{ می‌باشد}$$

$$\text{خاک مرطوب } LL = 40 < 50 \ \Rightarrow \ L$$

پس نام کامل این خاک آلی $\boxed{OL}$ است.

D-۱- آزمایش هیدرومتری

در این آزمایش ابتدا ۵۰ گرم از خاک ریزدانه را با مادهٔ پراکنندهٔ هگزامتا فسفات سدیم مخلوط می‌کنیم و می‌گذاریم تا چندین ساعت به همان حالت باقی بمانند تـا در نهایت ذرات بـه هـم چسبیده خاک از هـم جـدا شـوند. در ادامـه، مخلـوط موردنظر را در داخل استوانه‌ای مـدرج ریختـه و بـه آن آب اضافه می‌کنیم تا حجم این مجموع بـه $1000\, cm^3$ برسـد. حـال اسـتوانه را تکـان داده و روی میـز قـرار می‌دهیم تا از این لحظه به بعد با قرار دادن هیـدرومتر در داخل محلول، اعداد و ارقام مورد نیاز خـود را ثبـت کنیم.



سؤال: هیدرومتر چه کاری انجام می‌دهد و اعداد و ارقام مورد نیاز ما چه می‌باشند؟

پاسخ: در پاسخ به این سؤال باید بگوییم آزمایش هیدرومتری بر مبنـای قـانون اسـتوکس در مکانیک سیالات طراحی شده است که در آن سرعت سقوط ذرات (اجسام جامد) به مجذور قطر ذره ارتباط داده می‌شود. بر همین اساس می‌توان نوشت:

$$V \propto D^2 \quad \text{یا} \quad D \propto \sqrt{V} \quad \Rightarrow \quad D = K\sqrt{\frac{L}{t}}$$

که در رابطهٔ بالا:

L: فاصله سطح آزاد آب درون استوانه تا مرکز ثقل هیدرومتر است که عمق مؤثر نام دارد و بـا گذشت زمان تغییر می‌کند. (cm)

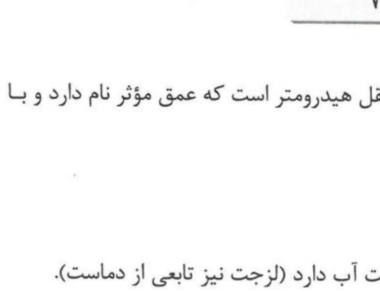
t: زمان گذشته از شروع آزمایش (min)

D: قطر ذرات معلق خاک در عمق مؤثر (mm)

K: ضریب ثابتی که بستگی به G_s خاک و لزجت آب دارد (لزجت نیز تابعی از دماست).

عملاً با کمک هیدرومتر مـی‌تـوانیم مقـدار خـاکی را کـه در حالـت معلـق (بـالای مرکـز ثقـل هیدرومتر) در لحظهٔ t وجود دارد، برحسب گرم به‌دست آوریـم. از طـرف دیگـر بـا قرائت L و دانستن مقدار K در لحظهٔ t، قطر ذرات خاک در عمق مؤثر نیز به‌دست می‌آید و ما می‌تـوانیم مقدار خاکی را که در لحظهٔ t معلق بوده و قطر آن از D کمتر است، برحسـب گـرم بـه‌دسـت آوریم.

نتیجه: مقطع ظرفِ محتوی محلول در عمق مؤثر، همانند یک الک با بعـد چـشمه‌هـای متغیـر عمل می‌کند به این ترتیب که در هر لحظه می‌توان گفت چه مقدار خاک (برحسب گرم) وجود دارد که قطر آنها از D کمتر است. شکل زیر به‌صورت شماتیک این مفهوم را نشان می‌دهد:



قسمت چهارم (مباحث تکمیلی شناخت و نامگذاری خاک‌ها)

زیر شاخه‌های قسمت چهارم

- **D-۱- آزمایش هیدرومتری**
- D-۲- معرفی منحنی دانه‌بندی ایده‌آل (منحنی فولر)
- D-۳- شرح آزمایش‌های حدود اتربرگ
- D-۴- آشنایی با سیستم طبقه‌بندی آشتو

تذکر ۱: برخی مراجع توصیه می‌کنند که اگر بخواهیم بر روی خاک ریزدانه آزمایش‌های هیدرومتری و حدود اتربرگ انجام دهیم، بهتر است به‌جای استفاده از الک شمارهٔ ۲۰۰، خاک عبوری از الک شمارهٔ ۴۰ را برای آزمایش استفاده کنیم. با اینکار مقداری ماسهٔ ریز نیز وارد آزمایش می‌شود و این به دقت آزمایش اضافه می‌کند، چرا که ممکن است برخی از ریزدانه‌ها به این ماسه‌های ریز چسبیده باشند و به این ترتیب وارد آزمایش شوند.

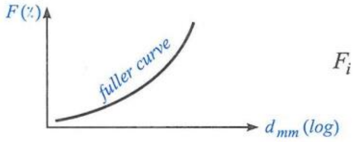
تذکر ۲: آزمایش هیدرومتری دو ایراد عمده دارد:

۱- قانون استوکس مخصوص ذرات کروی است، درحالیکه ذرات رسی بکار رفته در این آزمایش اغلب کانی‌های صفحه‌ای هستند و این موضوع تا حدودی از دقت آزمایش هیدرومتری می‌کاهد.

۲- در ذرات کوچکتر از $۰/۰۰۲mm$ قانون استوکس صادق نیست، چراکه در این حالت پدیده‌ای به نام **حرکت براونی** مولکول‌های آب، مانع از سقوط ذرات ریز می‌شود. جهت انجام آزمایش هیدرومتری بهترین محدوده برای ذرات بین $۰/۲mm$ تا $۰/۰۰۲mm$ می‌باشد، حال آنکه ذرات رسی از $۰/۰۰۲mm$ (۲ میکرون) کوچکترند و این از دقت آزمایش می‌کاهد.

D-۲- معرفی منحنی دانه‌بندی ایده‌آل (منحنی فولر)

منحنی دانه‌بندی ایده‌آل که یک نمایش فرضی از خاک خوب دانه‌بندی شده است، **منحنی فولر** نامیده می‌شود و معادلهٔ آن به‌صورت زیر است:



$$F_i = \sqrt{\frac{d_i}{d_{max}}} \times ۱۰۰$$

که در این رابطه:

$d_i =$ اندازهٔ ذرات خاک

$d_{max} =$ اندازهٔ بزرگترین ذرهٔ خاک

$F_i =$ درصد ذرات ریزتر از d_i

تذکر: همانطورکه ملاحظه می‌کنید، منحنی دانه‌بندی فولر کمی مقعر است زیرا غالب خاک بایستی درشت‌دانه باشد و مقعر بودن منحنی، نشان‌دهندهٔ همین موضوع است.

تمرین ۳۱: نتایج به‌دست آمده از یک آزمایش دانه‌بندی با الک به شرح جدول زیر است:

اندازه الک	$\frac{۳''}{۴}$	$\frac{۱''}{۴}$	NO۱۰	NO۴۰	NO۱۰۰	NO۲۰۰	pan
وزن مانده روی الک (گرم)	۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۰۰

در منحنی دانه‌بندی ایده‌آل (فولر) برای این خاک، چند درصد شن باید داشته باشیم؟

● **حل:** با توجه به جدول داده شده، هیچ خاکی روی الک با قطر $\frac{۳}{۴}$ اینچ نمانده است، بنابراین می‌توان گفت:

$$d_{max} = \frac{۳''}{۴} = ۲۵/۴ \times \frac{۳}{۴} \simeq ۱۹\ mm$$

۱ اینچ که معادل ۲۵/۴ میلی‌متر است

پس معادلهٔ منحنی فولر به‌صورت زیر خواهد بود:

$$F_i = \sqrt{\frac{d_i}{d_{max}}} \times ۱۰۰ = \sqrt{\frac{d_i}{۱۹}} \times ۱۰۰$$

حال برای محاسبهٔ درصد شن، ابتدا بایستی $F_۴$ یا درصد ذرات ریزتر از قطر $۴/۷۵\ mm$ را در منحنی فولر بیابیم:

$$F_۴ = \sqrt{\frac{۴/۷۵}{۱۹}} \times ۱۰۰ = ۵۰\%$$

پس درصد شن برابر است با:

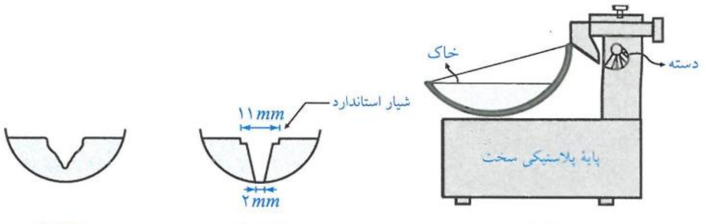
$$\text{درصد شن} = ۱۰۰ - F_۴ = ۱۰۰ - ۵۰ = ۵۰\%$$

D-۳- شرح آزمایش‌های حدود اتربرگ

در این بخش می‌خواهیم آزمایش‌های تعیین حد روانی، حد خمیری و حد انقباض را شرح دهیم:

۱- آزمایش تعیین حد روانی

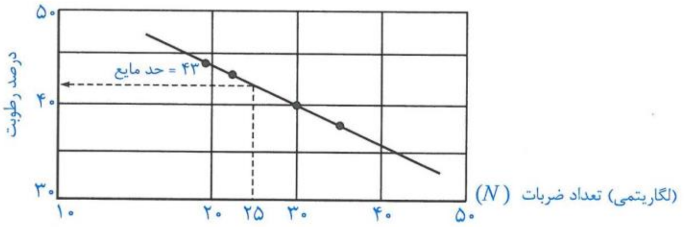
نمای جانبی وسیله اندازه‌گیری حد روانی در شکل (۱) نشان داده شده است. این وسیله شامل یک فنجان برنجی و یک پایه از پلاستیک سخت می‌باشد. با پیچاندن یک دسته، فنجان از روی پایه قدری بلند شده و بطور ناگهانی روی آن می‌افتد.



(شکل ۳) (شکل ۲) (شکل ۱)

نحوهٔ آزمایش به این‌صورت است که خمیر خاک در فنجان قرار داده می‌شود و توسط شیار زن، یک شیار استاندارد مطابق شکل (۲) در آن ایجاد می‌شود. سپس با پیچاندن دستهٔ دستگاه، فنجان از روی پایه بلند شده و از ارتفاع ۱۰ میلیمتری ($1\,cm$) برروی آن می‌افتد. درصد رطوبتی که به ازای آن به علت ۲۵ ضربه، شیار ایجاد شده در نمونهٔ داخل فنجان، مطابق شکل (۳) در طول $12/7\,mm$ (عمود بر صفحه) بسته می‌شود، حد روانی (حد مایع) خوانده می‌شود.

تنظیم رطوبت خاک بطوریکه دقیقاً با ۲۵ ضربه عرض شیار بسته شود مشکل است. لذا حداقل ۴ آزمایش برای خاک مورد مطالعه با رطوبت‌های مختلف انجام می‌شود و تعداد ضربات لازم برای بستن شیار اندازه‌گیری می‌شود. سپس مطابق شکل، درصد رطوبت، در مقابل تعداد ضربات N (در مقیاس لگاریتمی) رسم می‌شود. نمودار حاصله، نمودار جریان نامیده می‌شود که با داشتن آن می‌توان درصد رطوبت نظیر $N=25$ را که همان حد روانی است، به‌دست آورد. شیب خط جریان را **نشانه جریان** نامیده و آن را با I_F نمایش می‌دهند.



$$I_F=\frac{\omega_1-\omega_2}{\log(N_2/N_1)}$$

تذکر ۱: هرچه رطوبت داده شده به خاک کمتر باشد، خاک سفت‌تر خواهد بود و ضربات بیشتری برای بسته شدن شیار لازم دارد. رطوبت بیشتر نیز خاک را شل‌تر کرده و با ضربات کمتری شیار بسته می‌شود. درحالتی که رطوبت زیاد یا کم باعث شوند تا تعداد ضربات کمتر از ۱۵ یا بیشتر از ۳۵ شود، بایستی اطلاعات مربوطه در خارج از این محدوده را حذف کرده و برای رسم خط جریان از اطلاعاتی که در محدوده $15\le N\le 35$ است، استفاده نمود.

تذکر ۲: هر ضربه در وسیلهٔ استاندارد تعیین حد روانی، معادل $0/1\,kN/m^2$ تنش برشی به خاک اعمال می‌کند. پس مقاومت برشی خاک در رطوبت حد روانی برابر است با:

$$\tau_f=0/1\times 25=2/5\,kN/m^2=0/025\,kg/cm^2\approx \text{صفر}$$

این نشان می‌دهد که هرگاه رطوبت خاک به رطوبت حد روانی برسد، خاک عملاً مقاومت خود را از دست خواهد داد.

تذکر ۳: آزمایش حد روانی درواقع یک شیروانی خاکی را نشان می‌دهد (شکل ۲) که در یک رطوبت مشخص، در اثر اعمال تنش برشی ناچیز ($0/025\,kg/cm^2$) دچار فرو ریزش می‌شود (شکل ۳) این درصد رطوبت همان حد روانی است که خاک مقاومت خود را در آن ازدست داده است.

تمرین ۳۲: اگر در آزمایش حد روانی ارتفاع سقوط جام از $1cm$ بیشتر شود و یا به‌جای پایه پلاستیکی سخت از پایه پلاستیکی نرم استفاده کنیم، در آن‌صورت حد روانی به‌دست آمده از این آزمایش چه تفاوتی با حد روانی واقعی خاک خواهد داشت؟

● حل: آزمایش حد روانی مبنای آزمایشگاهی داشته و به استانداردهای آزمایش مقید است، بنابراین با تغییر در روش انجام آزمایش نسبت به استانداردها، مقدار حد روانی به‌دست آمده نیز با حد روانی واقعی خاک متفاوت خواهد شد. اگر ارتفاع سقوط جام از مقدار استاندارد بیشتر شود، انرژی و ضربهٔ قوی‌تری به خاک اعمال می‌شود. بنابراین در مقایسه با حالت استاندارد به رطوبت کمتری نیاز است تا با ۲۵ ضربه، شیار بسته شود (با رطوبت کمتر خاک سفت‌تر و مقاوم‌تر خواهد بود). پس می‌توان گفت حد روانی به‌دست آمده در این حالت (غیر استاندارد) از حد روانی واقعی خاک (حالت استاندارد) کمتر است.

زمانی که از پایهٔ پلاستیکی نرم به‌جای پایهٔ پلاستیکی سخت استفاده می‌شود، عکس این مطلب اتفاق می‌افتد. در این حالت انرژی و ضربه ضعیف‌تر شده و حد روانی به‌دست آمده از آزمایش از مقدار واقعی حد روانی بیشتر خواهد بود.

۲- آزمایش تعیین حد خمیری (آزمایش فتیله)

حد خمیری، میزان رطوبتی است که به ازای آن فتیله‌ای به قطر ۳/۲ میلیمتر که از خمیر خاک نمونه با روش غلتاندن ساخته می‌شود، ترک بخورد. حد خمیری پایین‌ترین میزان رطوبت مربوط به حالت خمیری خاک است. این آزمایش با غلتاندن تکه‌ای از خمیر خاک برروی یک صفحه شیشه‌ای به‌وسیلهٔ دست انجام می‌شود. با تکرار آزمایش برای نمونه‌های دیگری از خاک موردنظر، می‌توان حد خمیری اعلام شده برای خاک را با استفاده از میانگین مقادیر به‌دست آمده در هر آزمایش محاسبه کرد:

$$PL = \frac{\sum_{i=1}^{n} PL_i}{n}$$

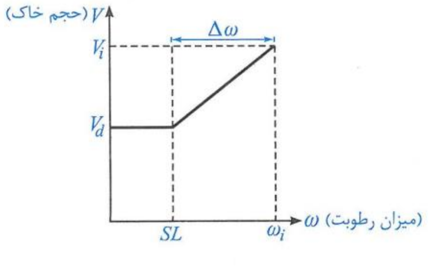
در رابطهٔ بالا، n تعداد آزمایش‌هاست که معمولاً بین ۳ تا ۵ می‌باشد و PL_i، حد خمیری به‌دست آمده در هر آزمایش است.

تذکر: آزمایش حد خمیری نیز مانند آزمایش حد روانی مبنای آزمایشگاهی داشته و مقید به استانداردهای آزمایش است.

۳- آزمایش تعیین حد انقباض

با ازدست دادن رطوبت، خاک منقبض می‌شود. با کاهش پیوسته رطوبت، مرحله‌ای می‌رسد که از آن به بعد کاهش رطوبت دیگر سبب کاهش حجم نمی‌شود. در قسمت دوم دیدیم که میزان رطوبت در این لحظه را حد انقباض می‌گویند.

برای تعیین حد انقباض در آزمایشگاه نمونه‌ای از خاک مرطوب درون یک ظرف چینی قرار داده می‌شود. سپس خاک در کوره خشک می‌گردد و پس از بیرون آوردن آن از کوره، کاهش حجم خاک (با ریختن جیوه) اندازه‌گیری می‌شود. در خاتمه باتوجه به نمودار نشان داده شده در شکل، حد انقباض به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:



$$SL = \omega_i - \Delta\omega = \left[\frac{W_1 - W_2}{W_2} - \frac{(V_i - V_d)\gamma_w}{W_2}\right] \times 100$$

که در آن:

W_1 = وزن خاک مرطوب در ظرف در شروع آزمایش (gr)

W_2 = وزن خاک خشک شده در ظرف (gr)

V_i = حجم اولیه خاک مرطوب (cm^3)

V_d = حجم خاک خشک شده در کوره (cm^3)

γ_w = وزن مخصوص آب (grf/cm^3)

تذکر ۱: رابطهٔ فوق را می‌توان برحسب جرم و دانسیته نیز به‌کار برد.

تذکر ۲: شما بدون نیاز به رابطهٔ بالا و تنها با استفاده از روش مفهومی که در قسمت دوم این فصل یاد گرفتید (روش سوم) نیز می‌توانید حد انقباض را محاسبه کنید.

D-۴- آشنایی با سیستم طبقه‌بندی آشتو

در سیستم آشتو که توسط ترزاقی ارائه شده است، موارد زیر قابل توجه می‌باشد:

۱) ملاک جدایی درشت‌دانه و ریزدانه از هم، الک شمارهٔ ۲۰۰ (mm ۰/۰۷۵) است. اگر درصد گذرنده (عبوری) از الک شماره ۲۰۰ بیشتر از ۳۵ درصد کل دانه‌های خاک باشد، در آن‌صورت تودهٔ خاک، ریزدانه به حساب می‌آید و در غیر اینصورت درشت‌دانه است.

۲) مرز جدایی شن و ماسه از هم، الک شماره ۱۰ (mm ۲) است.

۳) در این سیستم (آشتو) خاک‌ها در ۸ رده به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

اندازهٔ خاک	توصیف خاک	ردهٔ خاک
درشت‌دانه	مخلوط شن و ماسه و قلوه‌سنگ	$A-۱$
	مخلوط شن و ماسه لای‌دار یا رس‌دار	$A-۲$
	ماسه ریز	$A-۳$
ریزدانه	لای با حد روانی پایین	$A-۴$
	لای با حد روانی بالا	$A-۵$
	رس با حد روانی پایین	$A-۶$
	رس با حد روانی بالا	$A-۷$
	خاک آلی	$A-۸$

همانطور که ملاحظه می‌کنید، در طبقه‌بندی آشتو با افزایش رده خاک، خاک ریزدانه‌تر شده و برای کارهای راهسازی نامناسب‌تر می‌گردد.

تمرین ۳۳: در یک نمونه خاک، درصد عبوری از الک ۲۰۰ برابر ٪۴۰ است، کدام نام‌گذاری در سیستم طبقه‌بندی آشتو برای این خاک محتمل نمی‌باشد؟

۱) $A-۷$ ۲) $A-۵$ ۳) $A-۴$ ۴) $A-۲$

● حل:

$F_{۲۰۰} = ۴۰٪ > ۳۵٪ \Rightarrow$ خاک ریزدانه است $\Rightarrow$ $A-۴$، $A-۵$، $A-۶$ یا $A-۷$

یعنی نام خاک در سیستم طبقه‌بندی آشتو نمی‌تواند $A-۲$ باشد، زیرا این رده‌بندی مربوط به یک خاک درشت‌دانه است. پس گزینه (۴) پاسخ این تست است.

توجه: برای مشاهدهٔ جزئیات بیشتر طبقه‌بندی خاک‌ها طبق سیستم آشتو، به **فصل چهارم کتاب نسل جدید روسازی سری عمران** مراجعه کنید.

تمرین ۳۴: یک خاک مصنوعی از تعداد مساوی، کره‌های یکنواخت شیشه‌ای از یـک جـنس و بـا قطرهای ۱ و ۲ و ۳ میلی‌متر تشکیل یافته است. مقدار ضریب انحنای این خاک کدام است؟

۱) ۱/۵   ۲) ۱/۳۳   ۳) ۰/۳۳   ۴) ۱

● حل: برای تعیین ضریب انحناء به منحنی دانه‌بندی نیـاز اسـت و در منحنـی دانـه‌بنـدی نیـز ملاک، درصد وزنی ذرات خاک اسـت. ذرات مـوردنظر در ایـن سـؤال کـروی و از یـک جـنس هستند، بنابراین وزن آنها با توان سوم قطر ذرات متناسب خواهد بود:

$$W = \gamma V = \gamma(\frac{\pi D^{3}}{6}) \xrightarrow{\gamma = const} W \propto D^{3}$$

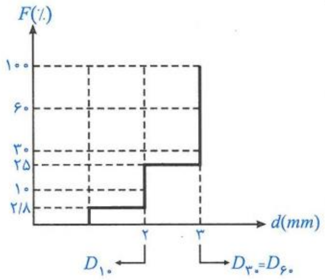
حال درصد وزنی کره‌ها را به‌دست می‌آوریم که باتوجه بـه مـساوی بـودن تعـداد آنهـا خـواهیم داشت:

درصد وزنی کره‌های ۱ میلی‌متری $= (\frac{1^{3}}{1^{3}+2^{3}+3^{3}}) \times 100 = 2/8\%$

درصد وزنی کره‌های ۲ میلی‌متری $= (\frac{2^{3}}{1^{3}+2^{3}+3^{3}}) \times 100 = 22/2\%$

درصد وزنی کره‌های ۳ میلی‌متری $= (\frac{3^{3}}{1^{3}+2^{3}+3^{3}}) \times 100 = 75\%$

و در نهایت با ترسیم منحنی دانه‌بندی، C_c را می‌یابیم:

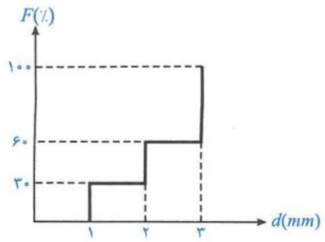


$$\Rightarrow \begin{cases} D_{10} = 2mm \\ D_{30} = 3mm \\ D_{60} = 3mm \end{cases}$$

$$\Rightarrow C_c = \frac{D_{30}^{2}}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{3^{2}}{3 \times 2} = 1/5$$

بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۳۵: یک ماسه مصنوعی به وزن ۵ کیلوگرم از تعدادی گـوی شیـشه‌ای بـه قطـر ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر تشکیل شده است و منحنی دانه‌بندی آن به‌صورت زیـر اسـت. اگـر ۵ کیلـوگرم گـوی شیشه‌ای به قطر ۲ میلی‌متر به مجموعه اضافه شود، در آن‌صورت منحنی دانه بندی حاصل چگونه خواهد بود؟



● حل: در حالت اول (وضعیت موجود) وزن هر کدام از گوی‌های شیشه‌ای به‌صـورت زیـر قابـل محاسبه است:

$W_1 = 5 \times 30\% = 1/5\ kg$

$W_2 = 5 \times (60\% - 30\%) = 1/5\ kg$

$W_3 = 5 \times (100\% - 60\%) = 2\ kg$

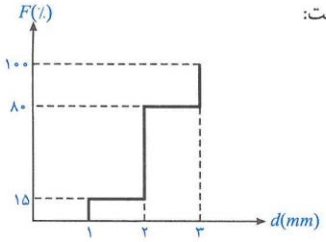
حال اگر $۵\,kg$ گوی ۲ میلی‌متری به مجموعه اضافه شود، در آن‌صورت درصد وزنی جدید گوی‌ها در مجموعه برابر است با:

$$\text{درصد وزنی گوی‌های ۱ میلی‌متری} = \frac{\text{وزن گوی‌های ۱ میلی‌متری}}{\text{وزن کل گوی‌ها}} \times ۱۰۰ = \frac{۱/۵}{۵+۵} \times ۱۰۰ = ۱۵\,\%$$

$$\text{درصد وزنی گوی‌های ۲ میلی‌متری} = \frac{\text{وزن گوی‌های ۲ میلی‌متری}}{\text{وزن کل گوی‌ها}} \times ۱۰۰ = \frac{۱/۵+۵}{۵+۵} \times ۱۰۰ = ۶۵\,\%$$

$$\text{درصد وزنی گوی‌های ۳ میلی‌متری} = \frac{\text{وزن گوی‌های ۳ میلی‌متری}}{\text{وزن کل گوی‌ها}} \times ۱۰۰ = \frac{۲}{۵+۵} \times ۱۰۰ = ۲۰\,\%$$

پس در نهایت مشابه با تمرین قبل منحنی دانه‌بندی را ترسیم می‌کنیم که نتیجهٔ آن به‌صورت زیر است:



تمرین ۳۶: خاکی مرکب از ۴ نوع خاک یکنواخت A و B و C و D مطابق جدول زیر تشکیل شده است. حداقل چند کیلوگرم از خاک C کم کرده و به همان میزان به خاک B اضافه کنیم تا ضریب یکنواختی خاک بیش از ۴ شود؟ (توزیع دانه‌ها در هر محدوده را یکنواخت فرض کنید)

نوع خاک	اندازه (mm)	وزن (kg)
A	۲۰–۱۵	۵
B	۱۵–۵	۴۰
C	۵–۲	۴۵
D	کوچکتر از ۲	۱۰

۱) در حالت موجود ضریب یکنواختی بیشتر از ۴ است.
۲) $۵\,kg$
۳) $۱۰\,kg$
۴) $۱۵\,kg$

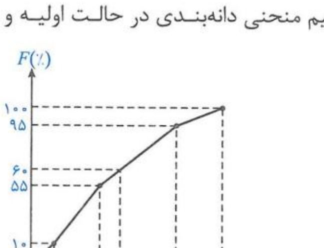
پاسخ: ابتدا وزن کل خاک را با ترکیب وزن‌های اولیه مصالح A و B و C و D می‌یابیم:

$$W_{\text{کل}} = W_A + W_B + W_C + W_D = ۵+۴۰+۴۵+۱۰ = ۱۰۰\,kg$$

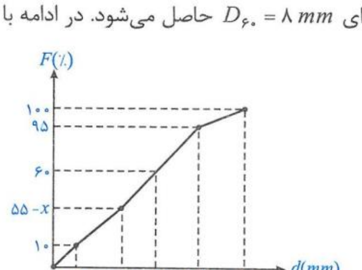
با توجه به جدول ارائه شده در صورت سؤال ملاحظه می‌شود که ۱۰ درصد ذرات خاک قطری کوچک‌تر از $۲\,mm$ دارند (خاک D)، بنابراین $D_{۱۰} = ۲\,mm$ می‌باشد. در حالت جدید نیز وزن کل و وزن خاک D ثابت است، بنابراین باز هم $D_{۱۰} = ۲\,mm$ است. اما برای اینکه C_u در حالت جدید بزرگ‌تر از ۴ باشد، بایستی داشته باشیم:

$$C_u = \frac{D_{۶۰}}{D_{۱۰}} > ۴ \Rightarrow D_{۶۰} > ۲ \times ۴ = ۸\,mm$$

پس حداقل میزان جابه‌جایی خاک بین B و C به‌ازای $D_{۶۰} = ۸\,mm$ حاصل می‌شود. در ادامه با ترسیم منحنی دانه‌بندی در حالت اولیه و حالت جدید خواهیم داشت:

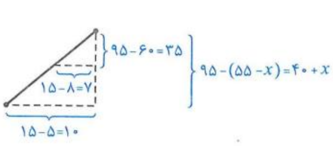


(حالت اولیه)



(حالت جدید)

حال مقدار x را به کمک قضیهٔ تالس، به‌صورت زیر می‌یابیم:



$$\frac{۴۰+x}{۳۵} = \frac{۱۰}{۷} \Rightarrow x = ۱۰\,kg$$

بنابراین گزینهٔ (۳) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۳۷: در آزمایش برروی ۵۰۰ گرم خاک رس، درصد وزنی ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلیمتر برابر ۱۰ درصد به‌دست آمده است. چند گرم رس با اندازهٔ کلوئیدی به خاک اضافه کنیم تا بدون تغییر در فعالیت خاک (A)، دامنهٔ خمیری آن ۲ برابر می‌شود؟

۱) ۵۰ ۲) ۶۲/۵ ۳) ۷۵ ۴) ۸۷/۵

● حل: طبق آنچه در متن درس گفته شد، فعالیت خاک (A) را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$A=\frac{PI}{\text{درصد وزنی ذرات رس (کوچکتر از ۲ میکرون)}}$$

حال اگر A ثابت باشد (نوع کانی‌های رس تغییر نکند)، می‌توان گفت نشانه خمیری خاک (PI) با درصد وزنی ذرات رسی کلوئیدی (CP) متناسب است:

$$\frac{PI_۲}{PI_۱}=\frac{CP_۲}{CP_۱}\ \Rightarrow\ ۲=\frac{CP_۲}{۱۰}\ \Rightarrow\ CP_۲=۲۰\%$$

اما $CP_۲$ یا درصد وزنی ذرات رسی کوچکتر از ۲ میکرون را می‌توان به‌صورت زیر و برحسب وزن خاک اضافه شده، نوشت:

$$CP_۲=\frac{\text{وزن اولیه رس‌های کوچکتر از ۲ میکرون + وزن رس جدید که تمام آن از ۲ میکرون کوچکتر است}}{\text{وزن کل خاک که شامل وزن اولیه و وزن رس اضافه شدهٔ جدید است}}\times ۱۰۰$$

$$=\frac{۰/۱\times ۵۰۰+m}{۵۰۰+m}\times ۱۰۰=(\frac{۵۰+m}{۵۰۰+m})\times ۱۰۰$$

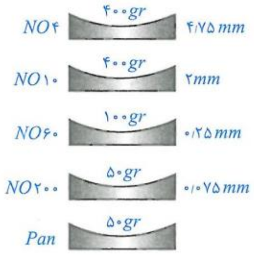
حال با در نظر گرفتن دو مقدار به‌دست آمده برای $CP_۲$، m را می‌یابیم:

$$۲۰=(\frac{۵۰+m}{۵۰۰+m})\times ۱۰۰\ \Rightarrow\ m=۶۲/۵\ gr$$

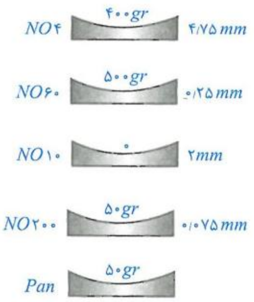
یعنی گزینه (۲) درست است.

تمرین ۳۸: در یک آزمایش دانه‌بندی از الک‌های $NO\ ۴$، $NO\ ۱۰$، $NO\ ۶۰$، $NO\ ۲۰۰$ و در نهایت ظرف (Pan) استفاده می‌شود. برای یک نوع خاک، دو شخص مختلف این آزمایش را انجام می‌دهند. یکی الک‌ها را به‌ترتیب چیده و دومی جای الک $NO\ ۱۰$ و $NO\ ۶۰$ را اشتباه کرده است. اگر نتایج صحیح حاصل از آزمایش اول به‌صورت شکل زیر باشد، شخص دوم ضریب یکنواختی (C_u) را چقدر به‌دست می‌آورد؟

۱) ۱۹
۲) ۲/۳۷۵
۳) ۸
۴) قابل محاسبه نیست.



● حل: اگر ترتیب الک‌ها مطابق شکل زیر باشد، با توجه به اینکه جای الک‌های $NO\ ۱۰$ و $NO\ ۶۰$ با هم عوض شده است، تمام $۵۰۰\ gr$ خاک این دو الک، بر روی الک $NO\ ۶۰$ باقی می‌ماند، زیرا دانه‌های باقی‌مانده روی الک $NO\ ۱۰$ که از $۲\ mm$ درشت‌تر می‌باشند، قطعاً از $۰/۲۵\ mm$ در الک $NO\ ۶۰$ نیز درشت‌تر بوده و از آن رد نمی‌شوند. پس درصدهای عبوری از هر الک به‌صورت زیر می‌باشند:



$NO\ ۴$: $\Rightarrow$ درصد عبوری $=\frac{۵۰۰+۵۰+۵۰}{۱۰۰۰}\times ۱۰۰=۶۰\%$

$NO\ ۶۰$: $\Rightarrow$ درصد عبوری $=\frac{۵۰+۵۰}{۱۰۰۰}\times ۱۰۰=۱۰\%$

$NO\ ۱۰$: $\Rightarrow$ درصد عبوری $=\frac{۵۰+۵۰}{۱۰۰۰}\times ۱۰۰=۱۰\%$

$NO\ ۲۰۰$: $\Rightarrow$ درصد عبوری $=\frac{۵۰}{۱۰۰۰}\times ۱۰۰=۵\%$

با توجه به درصدهای عبوری به‌دست آمده می‌توان گفت:

مربوط به الک $NO\,4$ ← $4/75\ mm$ = قطری که ٪۶۰ ذرات خاک از آن ریزترند (٪۶۰ خاک از الک با این قطر عبور کرده‌اند) = D_{60}

مربوط به الک $NO\,10$ ← $2\ mm$ = بزرگترین قطری که ٪۱۰ ذرات خاک از آن ریزترند (٪۱۰ خاک از الک با این قطر عبور کرده‌اند) = D_{10}

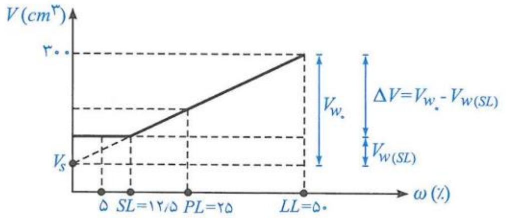
در واقع در تعیین D_{10}، از بین قطرهای $2\ mm$ (الک $NO\,10$) و $0/25\ mm$ (الک $NO\,60$) قطر بزرگتر یعنی $2\ mm$ را انتخاب می‌کنیم.

در نهایت C_u خاک در این حالت برابر می‌شود با:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{4/75}{2} = 2/375$$

پس گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح است، اگرچه آزمایش انجام شده، ایراد داشته و نتیجهٔ آن کاربردی نمی‌باشد.

تمرین ۳۹: یک نمونه خاک رس با رطوبت ۵۰ درصد موجود است. با افزایش تدریجی رطوبت سرانجام مقاومت خاک از بین می‌رود. در این حالت حجم نمونه $300\ cm^3$ و وزن آن $600\ gr$ می‌باشد. اگر حد خمیری و نشانه خمیری خاک دوبرابر حد انقباض باشند و حد انقباض نیز برابر ۱۲/۵ بدست آمده باشد، در آن‌صورت میزان افزایش حجم این نمونه چند cm^3 است؟



پاسخ: در رطوبت حد روانی خاک مقاومت خود را از دست می‌دهد، بنابراین افزایش حجم خواسته شده در این مسئله مربوط به حد روانی است. افزایش حجم خاک نیز از حد انقباض شروع می‌شود، بنابراین از رطوبت ٪۵ تا ٪۱۲/۵ افزایش حجمی نخواهیم داشت. باتوجه به این توضیحات و نیز اطلاعات داده شده درصورت سؤال خواهیم داشت:

$$PL = PI = 2SL = 2\times 12/5 = 25 \Rightarrow LL = PL + PI = 25 + 25 = 50$$

$$W_{کل} = W_s\,(1+\omega) \Rightarrow 600 = W_s\,(1+0/5) \Rightarrow W_s = 400\ gr\ ,\ W_{w_0} = 600 - 400 = 200\ gr$$

$$\Rightarrow V_{w_0} = \frac{W_{w_0}}{\gamma_w} = \frac{200}{1} = 200\ cm^3$$

$$\omega_{SL} = \frac{W_{w\,(SL)}}{W_s} \Rightarrow 0/125 = \frac{W_{w\,(SL)}}{400} \Rightarrow W_{w\,(SL)} = 50\ gr \Rightarrow V_{w\,(SL)} = \frac{50}{1} = 50\ cm^3$$

$$\Delta V = V_{w_0} - V_{w\,(SL)} = 200 - 50 = 150\ cm^3$$

تمرین ۴۰: نتایج زیر از آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ برروی یک خاک استخراج شده است. نام خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد چیست؟

F_{200}	F_4	LL	PI	D_{10}	D_{30}	D_{60}
۱۰	۸۰	۱۵	۶	۰/۱	۰/۶	۲/۵

۱) $SW-(SM-SC)$

۲) $SP-(SM-SC)$

۳) $SW-SM$

۴) $SP-SC$

پاسخ: باتوجه به گزینه‌ها مشخص است که خاک، ماسه‌ای حدفاصل است، بنابراین برای تعیین حرف دوم در نام خاک، هم به کیفیت دانه‌بندی $(C_u\ ,\ C_c)$ و هم به نوع خاک ریزدانه نیاز داریم:

الف- کیفیت دانه‌بندی

$$\begin{cases} C_c = \dfrac{D_{30}^2}{D_{60}\times D_{10}} = \dfrac{0/6^2}{2/5\times 0/1} = 1/44 \Rightarrow 1 < C_c < 3 \\ C_u = \dfrac{D_{60}}{D_{10}} = \dfrac{2/5}{0/1} = 25 > 6 \end{cases} \Rightarrow W$$

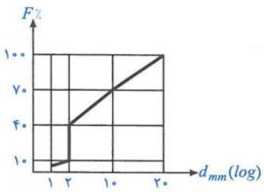
ب: نوع خاک ریزدانه

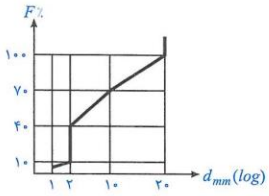
$$\begin{cases} PI_{موجود} = 6 \Rightarrow 4 < PI < 7 \\ PI_A = 0/73(LL-20) = 0/73(15-20) < 0 \end{cases} \Rightarrow PI > PI_A \Rightarrow C-M$$

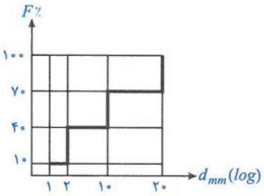
بنابراین نام کامل خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد $\boxed{SW-(SM-SC)}$ خواهد بود که البته بهتر است به‌صورت $SW-SM$ و $SW-SC$ نوشته شود. پس گزینه (۱) جواب درست است.

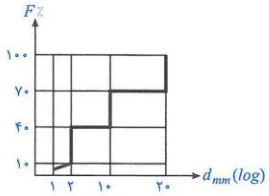
تست‌های فصل دوم

۱- نتایج زیر در یک آزمایش دانه‌بندی به‌دست آمده است. منحنی دانه‌بندی کدامیک از پاسخهای ذیل خواهد بود؟ ۳۰ درصد از خاک دارای قطر دانه معادل $۲۰mm$، ۳۰ درصد خاک دارای قطر دانه معادل $۱۰mm$، ۳۰ درصد از خاک دارای قطر دانه معادل $۲mm$، ۱۰ درصد خاک دارای قطر دانه کمتر از $۲mm$ و ۵ درصد خاک دارای قطر دانه کمتر از $۱mm$ است. (سراسری - ۷۳)

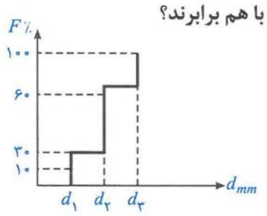
۱)


۲)


۳)


۴)


۲- منحنی دانه‌بندی یک خاک مصنوعی به شکل زیر است. در چه صورتی ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی با هم برابرند؟



۱) $d_۳ = ۲d_۲ = ۳d_۱ = ۶\ mm$
۲) $d_۳ = ۲d_۲ = ۴d_۱ = ۴\ mm$
۳) $d_۳ = ۱/۵d_۲ = ۳d_۱ = ۶\ mm$
۴) در هر صورت ضریب یکنواختی با ضریب دانه‌بندی برابر است.

۳- در یک آزمایش دانه‌بندی، ضریب یکنواختی ۴ برابر ضریب دانه‌بندی است. در این صورت نسبت $\frac{D_{۶۰}}{D_{۳۰}}$ کدام است؟

۱) ۴ ۲) $\frac{۱}{۴}$ ۳) ۲ ۴) $\frac{۱}{۲}$

۴- ۳ درصد از ذرات خاکی از الک نمرهٔ ۲۰۰ # عبور می‌کنند. اگر ضریب یکنواختی این خاک ۲/۵ و ضریب انحناء آن ۱/۸۵ باشد، در آن‌صورت کدام عبارت درمورد این خاک صحیح است؟ (سراسری - ۷۶)

۱) خاک مختلط با دانه‌بندی بد ۲) خاک درشت‌دانه با دانه‌بندی خوب
۳) خاک حدفاصل با دانه‌بندی خوب ۴) خاک درشت‌دانه با دانه‌بندی بد

۵- در یک تودهٔ خاک خشک به وزن ۸۰۰ گرم، ۹۰ درصد ذرات خاک را شن و ماسه تشکیل می‌دهند. چند گرم خاک رس خشک به این مجموعه اضافه کنیم تا درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ برابر ٪۲۰ شود؟

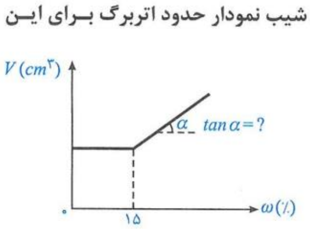
۱) ۸۰ ۲) ۱۰۰ ۳) ۱۲۰ ۴) هیچ‌کدام

۶- حجم یک نمونه خاک در حد روانی و خشک‌ترین حالت به‌ترتیب برابر ۴۰ و ۲۰ سانتی‌مترمکعب است. با استفاده از داده‌های جدول زیر، حجم نمونه در حد خمیری را تعیین کنید.

حد انقباض (SL)	حد روانی (LL)	دامنهٔ خمیری (PI)
۱۵	۶۵	۴۰

۱) $۲۴cm^۳$ ۲) $۲۶cm^۳$
۳) $۲۸cm^۳$ ۴) $۳۰cm^۳$

۷- یک نمونه خاک ریزدانه به وزن $۲۰۰gr$ پس از خشک شدن در کوره، $۴۰gr$ از وزنش کاسته می‌شود. شیب نمودار حدود اتربرگ برای این خاک کدام است؟



۱) ۴۰ سانتی‌متر مکعب
۲) ۱۶۰ سانتی‌متر مکعب
۳) ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب
۴) ۲۴۰ سانتی‌متر مکعب

۸- یک نمونه خاک رس اشباع به وزن $200gr$ و حجم $100cm^3$ پس از خشک شدن در کوره $40gr$ از وزنش کاسته می‌شود. اگـر حـد انقبـاض خاک برابر ۱۵ باشد، نسبت تخلخل خاک درحالت خشک چقدر است؟

۱) ۰/۴ ۲) ۰/۵۲ ۳) ۰/۶ ۴) ۰/۶۷

۹- نمونه‌ای از خاک رس اشباع دارای حجم $35cm^3$ و وزن $60\ gr$ است. پس از خشک کردن نمونه حجـم آن $20cm^3$ کـاهش یافتـه و وزن آن به $40\ gr$ تقلیل پیدا می‌کند. چگالی ذرات جامد و حد انقباض این خاک کدام است؟ (وزن مخصوص آب: $\gamma_w = 1\,gr/cm^3$) (سراسری - ۹۳)

۱) ۲/۷۵ و ٪۵۰ ۲) ۲/۶۷ و ٪۲۰ ۳) ۱/۹ و ٪۱۵ ۴) ۱/۷۱ و ٪۵۰

۱۰- دو خاک A و B با طبقه SC با مشخصات ذیل موجود می‌باشند، کدام گزینه صحیح است؟ (سراسری - ۹۳)

	خاک A	خاک B
درصد عبوری از الک نمره ۴	۷۰	۷۰
اندازه لای	۵	۱۵
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰	۲۰	۲۰
اندازه رس	۱۵	۵

۱) نفوذپذیری خاک A کمتر و حد روانی آن بیشتر است.
۲) نفوذپذیری و حد روانی خاک B کمتر است.
۳) نفوذپذیری و حد روانی خاک A بیشتر است.
۴) نفوذپذیری و حد روانی خاک B بیشتر است.

۱۱- آزمایش دانه‌بندی برروی یک نمونه خاک نشان داده است که درصد گذرنده از الک شمارهٔ ۲۰۰ برابر ٪۶۰ است. اگر حد خمیری و حد روانـی بخش ریزدانهٔ خاک به‌ترتیب برابر ۳۵ و ۶۰ باشند، نام خاک را در سیستم طبقه‌بندی متحد تعیین کنید.

۱) MH ۲) CH ۳) ML ۴) CL

۱۲- در یک آزمایش دانه‌بندی خاک، درصد وزنی مانده روی الک شمارهٔ ۴، ۱۰ درصد و وزن دانه‌های درشت‌تر از الـک شـمارهٔ ۲۰۰، ۲۰ درصـد وزن خاک را شامل می‌شود. اگر حدود اتربرگ بخش ریزدانه خاک $LL = 35$ و $PL = 15$ باشد، براساس سیستم طبقه‌بندی متحد نام خاک چیست؟

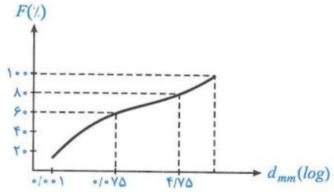
۱) SC ۲) CL ۳) CH ۴) SM

۱۳- آزمایش دانه‌بندی برروی یک نمونه خاک، درصد محدوده‌های مختلف اندازهٔ ذرات خاک را به شرح جدول زیر مشخص کرده است. اگـر حـد خمیری و حد روانی بخش ریزدانه خاک به‌ترتیب برابر ۲۵ و ۷۰ باشند، نام خاک را در سیستم طبقه‌بندی متحد تعیین کنید.

اندازه ذرات (mm)	۰/۰۰۱ ~ ۰/۰۷۵	۰/۰۷۵ ~ ۲	۲ ~ ۴	۴ ~ ۶
درصد وزنی (٪)	۶۰	۲۵	۱۰	۵

۱) SC ۲) SM ۳) MH ۴) CH

۱۴- منحنی دانه‌بندی یک نمونه خاک مطابق شکل زیر است. اگر حد روانی و نشانهٔ خمیری بخش ریزدانهٔ خاک به‌ترتیب برابر ۶۰ و ۲۰ باشند، در آن‌صورت نام خاک طبق سیستم طبقه‌بندی متحد کدام است؟



۱) SC
۲) SM
۳) MH
۴) CH

۱۵- ۷۰ درصد خاکی از الک نمرهٔ ۴ و ۳ درصد آن از الک نمرهٔ ۲۰۰ می‌گذرد. اگر $D_{60} = 3\ mm$ ، $D_{30} = 1/2\ mm$ و $D_{10} = 0/2\ mm$ باشـد، نـام خاک براساس سیستم طبقه‌بندی متحد کدام است؟

۱) GP ۲) GW ۳) SW ۴) SP

۱۶- دانه‌بندی خاکی به شرح ذیل می‌باشد: (سراسری - ۸۵)

مانده روی الک نمرهٔ ۴ ($4/75\ mm$) = ٪۴۵ وزنی کل نمونه
مانده روی الک نمرهٔ ۲۰۰ ($0/075\ mm$) = ٪۵۰ وزنی کل نمونه
رد شده از الک نمرهٔ ۲۰۰ ($0/075\ mm$) = ٪۵ وزنی کل نمونه
نام خاک در روش طبقه‌بندی متحد چه می‌باشد؟

۱) SC ۲) SM ۳) GW ۴) SW

۱۷- در یک نمونهٔ خاک درصد گذرنده از الک‌های شمارهٔ ۴ و ۲۰۰ به‌ترتیب برابر ٪۶۰ و ٪۲۵ است. اگر حد روانی و حد خمیری بخش ریزدانه آن به‌ترتیب ۲۳ و ۲۰ باشند، نام این خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد کدام است؟

۱) SC ۲) SM ۳) GM ۴) GC

۱۸- در یک خاک نتایج زیر از آزمایش دانه‌بندی استخراج شده است. نام خاک را در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (متحد) مشخص کنید.

$F_{۴} = ۱۰۰٪$ ، $F_{۲۰۰} = ۸٪$ ، $C_u = ۱/۵۹$ ، $C_c = ۰/۰۱۲$ ، $LL = ۳۰$ ، $PI = ۸$

۱) GM ۲) $GW-GC$ ۳) SP ۴) $SP-SC$

۱۹- ۹۰ درصد از ذرات خاکی از الک نمرهٔ ۴ و فقط ۱۴ درصد از این ذرات از الک نمرهٔ ۲۰۰ عبور کرده‌اند. در صورتی که ضریب یکنواختی این خاک برابر ۷ و ضریب خمیدگی آن برابر ۲ و همچنین حد روانی آن برابر ۲۰ و حد خمیری آن برابر ۱۷ باشند، رده این خاک براساس طبقه‌بندی متحد کدام است؟ (سراسری - ۸۱)

۱) SM ۲) GP ۳) CH ۴) $SW-SP$

۲۰- نتایج زیر از آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ برروی یک خاک استخراج شده است. نام خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد چیست؟

$D_{۶۰}$	$D_{۳۰}$	$D_{۱۰}$	PI	LL	$F_{۴}$	$F_{۲۰۰}$
۲/۵	۰/۶	۰/۱	۶	۱۵	۸۰	۱۰

۱) $SW-(SM-SC)$
۲) $SP-(SM-SC)$
۳) $SW-SM$
۴) $SP-SC$

۲۱- بعد از آزمایش دانه‌بندی برروی یک نمونه خاک مشخص شد که ۶ درصد این خاک از الک شمارهٔ ۲۰۰ و ۶۳ درصد آن از الک شمارهٔ ۴ عبور کرده است. حد روانی و حد خمیری بخش ریزدانه آن نیز براساس آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ به‌ترتیب ۵۵ و ۳۵ به‌دست آمده‌اند. اگر ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی خاک $C_u = ۲۳/۵$ و $C_c = ۱/۵$ باشند، در این صورت نام خاک در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید ($USCS$) چیست؟

۱) $SW-SM$ ۲) $SP-SM$ ۳) $SP-SC$ ۴) $SW-SC$

مباحث تکمیلی شناخت و نام‌گذاری خاک‌ها

۲۲- در یک آزمایش هیدرومتری، ۳۰ دقیقه بعد از شروع ته‌نشینی ذرات خاک، قطر کوچکترین ذره‌ای که در لحظهٔ اندازه‌گیری از مرکز ثقل هیدرومتر می‌گذرد، برابر $۰/۰۰۶mm$ است. اگر با توجه به چگالی ذرات خاک و دمای آزمایش $K = ۰/۰۱۲$ باشد، در آن‌صورت قرائت عمق مؤثر چند cm است؟

۱) ۵ ۲) ۷/۵ ۳) ۱۰ ۴) ۱۵

۲۳- با انجام آزمایش برروی یک نمونهٔ خاک مشخص شده است که حداقل رطوبت لازم برای تبدیل این خاک به حالت خمیری برابر ٪۱۸/۷ است. با انجام آزمایش حد روانی برروی نمونه‌ای دیگر از این خاک نتایج زیر حاصل شده است:

نشانهٔ خمیری خاک کدام است؟

تعداد ضربات (N)	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
درصد رطوبت (ω)	۴۲	۴۰/۴	۳۹/۱	۳۸

۱) ۳۹/۱ ۲) ۱۸/۷ ۳) ۲۰/۴ ۴) ۲۳/۳

۲۴- خاک عبوری از الک شمارهٔ ۴۰ در یک آزمایش دانه‌بندی تحت آزمایش حد خمیری قرار می‌گیرد. طبق مشاهدات انجام شده، رطوبت‌های ۱۸/۳، ۱۸/۷ و ۱۹/۱ باعث ترک خوردن فتیله‌هایی به قطر تقریبی ۳ میلی‌متر از خمیر خاک موردنظر شده است. حد خمیری این خاک برابر است با:

۱) ۱۸/۳ ۲) ۱۸/۷ ۳) ۱۸/۹ ۴) ۱۹/۱

۲۵- اگر در یک دستگاه اندازه‌گیری حد روانی در حالت استاندارد، هر ضربه به‌طور متوسط بیانگر اعمال $۰/۹\ gr/cm^۲$ تنش برشی به خاک باشد، در آن‌صورت مقاومت ناچیز خاک در حد روانی (براساس این دستگاه) چند $gr/cm^۲$ خواهد بود؟

۱) ۲۲/۵ ۲) ۱۸ ۳) ۳۶ ۴) ۰/۹

پاسخ تست‌های فصل دوم

۱- (۴)

برای پاسخ به این تست بیایید اطلاعات داده شده در صورت سؤال را یک‌به‌یک بررسی کرده و ببینیم کدام یک از این منحنی‌های دانه‌بندی با آن مطابقت دارند:

۱) ۳۰ درصد از ذرات خاک دارای قطری معادل ۲۰ mm می‌باشند، پس در منحنی دانه‌بندی و بالای این قطر، باید یک خط قائم با ارتفاع ٪۳۰ داشته باشیم. بدین ترتیب گزینه‌های (۱) و (۲) حذف شده و فقط گزینه‌های (۳) و (۴) باقی می‌مانند.

۲) با توجه به آنکه تفاوت گزینه‌های (۳) و (۴) در قسمت انتهایی منحنی‌های دانه‌بندی می‌باشد، فقط کافیست اطلاعات پایانی صورت سؤال را بررسی نماییم:

- ۱۰ درصد از ذرات خاک دارای قطری کمتر از ۲ mm هستند، پس نقطه با مختصات $(d_i = 2\ mm\ ,\ F_i = 10\%)$ روی منحنی دانه‌بندی وجود دارد (هر دو گزینه این ویژگی را دارند).
- ۵ درصد ذرات این خاک دارای قطری کمتر از ۱ mm می‌باشند، پس نقطه با مختصات $(d_i = 1\ mm\ ,\ F_i = 5\%)$ روی منحنی دانه‌بندی وجود دارد که گزینهٔ (۳) فاقد این نقطه بوده و نادرست است ولی گزینهٔ (۴) این نقطه را نیز داشته و صحیح می‌باشد.

۲- (۴)

طبق تعریف C_u و C_c می‌نویسیم:

$$\begin{cases} C_u = \dfrac{D_{60}}{D_{10}} = \dfrac{d_2}{d_1} \\[2ex] C_c = \dfrac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \dfrac{d_2^2}{d_2 \times d_1} = \dfrac{d_2}{d_1} \end{cases}$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید، برای منحنی دانه‌بندی داده شده در هر صورت $C_u = C_c$ می‌باشد.

۳- (۳)

$$C_u = 4C_c \ \Rightarrow\ \frac{D_{60}}{D_{10}} = 4\frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \ \Rightarrow\ D_{60}^2 = 4D_{30}^2 \ \Rightarrow\ \frac{D_{60}}{D_{30}} = \sqrt{4} = 2$$

۴- (۴)

چون میزان ریزدانهٔ خاک (درصد عبوری از الک $NO\ 200$) ۳ درصد بوده و کم است، پس خاک درشت‌دانه می‌باشد. از طرفی ضریب یکنواختی $C_u = 2/5$ بوده که هیچکدام از دو شرط $C_u \geq 6$ برای ماسه و $C_u \geq 4$ برای شن را ارضاء نمی‌کند. لذا این خاک درشت‌دانه دارای دانه‌بندی بد می‌باشد.

۵- (۲)

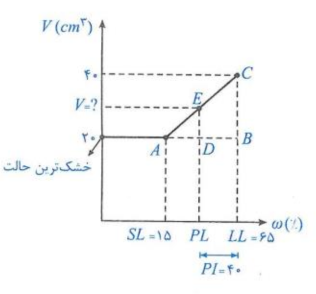
می‌دانیم درصد عبوری از الک ۲۰۰، همان درصد ریزدانهٔ خاک است که در این سؤال، در حالت جدید به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{200} = \text{درصد ریزدانه} = \frac{\text{وزن ریزدانهٔ خاک}}{\text{وزن کل خاک}} \times 100 = \frac{\overbrace{\text{وزن اولیهٔ ریزدانه}}^{(100\% - 90\%) \times 800} + \text{وزن رس اضافه شده}}{\text{وزن کل اولیه} + \text{وزن رس اضافه شده}} \times 100$$

بنابراین با جایگذاری مقادیر داده شده از صورت سؤال، خواهیم داشت:

$$\Rightarrow\ 20 = \frac{0/1 \times 800 + m}{800 + m} \times 100 \ \Rightarrow\ m = 100\ gr$$

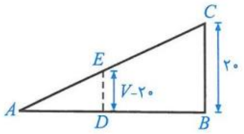
۶- (۱)



ابتدا نمودار حدود اتربرگ را به‌صورت مقابل رسم می‌کنیم و با اطلاعات داده شده در صورت سؤال، PL را نیز می‌یابیم:

$$PL = LL - PI = 65 - 40 = 25$$

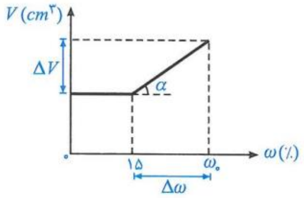
حال مثلث‌های ABC و ADE در شکل صفحهٔ قبل را در نظر گرفته و می‌نویسیم:



$$\begin{cases} \dfrac{\overline{ED}}{\overline{BC}} = \dfrac{\overline{AD}}{\overline{AB}} \\ \overline{AD} = PL - SL = ۲۵ - ۱۵ = ۱۰ \\ \overline{AB} = LL - SL = ۶۵ - ۱۵ = ۵۰ \end{cases} \Rightarrow \frac{V - ۲۰}{۲۰} = \frac{۱۰}{۵۰} \Rightarrow V = ۲۴\,cm^۳$$

۷- (۲)

با توجه به نمودار، شیب خط موردنظر برابر است با:



$$\tan\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta\omega}$$

می‌دانیم تغییر حجم خاک (ΔV)، ناشی از محو شدن (خشک شدن) آب موجود در آن تا رطوبت حد انقباض است، پس ΔV برابر می‌شود با:

$$\Delta V = \Delta V_w = \frac{\Delta W_w}{\gamma_w}$$

همچنین میزان کاهش درصد رطوبت خاک تا این نقطه نیز عبارت است از:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta W_w}{W_s}$$

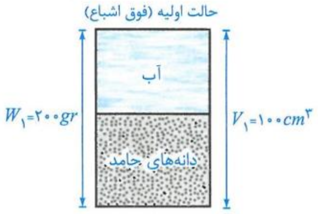
پس در نهایت شیب نمودار برابر می‌شود با:

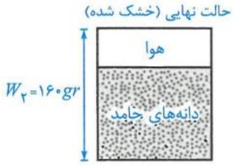
$$\tan\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta\omega} = \frac{\dfrac{\Delta W_w}{\gamma_w}}{\dfrac{\Delta W_w}{W_s}} = \frac{W_s}{\gamma_w} = \frac{۲۰۰ - ۴۰}{۱} = ۱۶۰\,cm^۳$$

توجه: رابطهٔ مربوط به شیب نمودار اتربرگ را قبلاً در متن درس، در قسمت (ج) از تمرین (۱۱) به‌دست آورده بودیم.

۸- (۱)

برای حل این سؤال بهتر است تا ابتدا دیاگرام‌های سه فازی خاک را در حالت‌های اولیه (فوق اشباع) و نهایی (خشک) رسم کنیم:





حال با توجه به دیاگرام‌های سه فازی می‌نویسیم:

$$\begin{cases} W_۲ = W_s = ۱۶۰\,gr \\ W_۱ = W_{w_۱} + W_s = ۲۰۰\,gr \end{cases} \xrightarrow{W_s\ \text{ثابت}} W_w = W_۱ - W_۲ = ۲۰۰ - ۱۶۰ = ۴۰\,gr$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{۴۰}{۱} = ۴۰\,cm^۳ \Rightarrow V_s = V_۱ - V_w = ۱۰۰ - ۴۰ = ۶۰\,cm^۳$$

در ادامه نیز می‌توانیم G_s خاک را به‌صورت مقابل به‌دست آوریم:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s\,\gamma_w} = \frac{۱۶۰}{۶۰ \times ۱} = ۲/۶۷$$

و در نهایت در رطوبت حد انقباض ($\omega_{SL} = ۰/۱۵$) خواهیم داشت:

$$\omega G_s = S_r\, e \Rightarrow ۰/۱۵ \times ۲/۶۷ = ۱ \times e \Rightarrow e = ۰/۴$$

(S_r: در حد انقباض خاک اشباع است)

۹- (۲)

مشابه با تست قبل و با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سوال می‌توان نوشت:

$$W_w = W_1 - W_2 = 60 - 40 = 20\,gr \quad (W_2 = W_s = 40\,gr) \qquad , \qquad V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} = \frac{20}{1} = 20\,cm^3$$

در حالت فوق اشباع اولیه: $V_s = V_1 - V_w \Rightarrow V_s = 35 - 20 = 15\,cm^3$

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} = \frac{40}{15 \times 1} = 2/67$$

بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح این تست است.

توجه ۱: اگرچه پاسخ این تست را گزینه (۲) بدست آوردیم ولی باید بدانید که این تست غلط است زیرا:

$$\begin{cases} \text{طبق صورت سؤال}: \Delta V = 20\,cm^3 \Rightarrow V_1 - V_2 = 20\,cm^3 \Rightarrow 35 - V_2 = 20\,cm^3 \Rightarrow V_2 = 15\,cm^3 \\ \text{طبق محاسبات وزنی و حجمی}: V_s = 15\,cm^3 \end{cases} \Rightarrow V_2 = V_s \Rightarrow V_v = 0$$

(V_2: حجم تودهٔ خاک در حالت خشک؛ V_s: حجم دانه‌های جامد)

که البته چنین چیزی غیرممکن است، چرا که در هیچ حالتی توده خاک نمی‌تواند فقط حاوی دانه‌های خاک باشد و هیچ فضای خالی در آن وجود نداشته باشد!

توجه ۲: اگر فرض کنیم که طراح اشتباه کرده و منظورش آن است که حجم ثانویه به $20\,cm^3$ رسیده است، در آن‌صورت می‌توان گفت در رطوبت حد انقباض، به اندازهٔ $5\,cm^3$ $(V_w = V - V_s = 20 - 15 = 5)$ آب داریم که معادل $5\,gr$ است. پس حد انقباض برابر می‌شود با:

$$\omega_{SL} = \frac{W_w}{W_s} = \frac{5}{40} = \frac{1}{8} \Rightarrow SL = 12/5\%$$

۱۰- (۱)

با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال در مورد الک‌ها و نیز مقادیر لای و رس، می‌توان ذرات تشکیل‌دهندهٔ خاک‌های A و B را به‌صورت زیر مشخص کرد:

خاک A شامل: ۳۰ درصد شن، ۵۰ درصد ماسه، ۵ درصد لای، ۱۵ درصد رس

خاک B شامل: ۳۰ درصد شن، ۵۰ درصد ماسه، ۱۵ درصد لای، ۵ درصد رس

همانطورکه مشاهده می‌کنید درصد درشت دانه (۸۰٪) و ریزدانه (۲۰٪) در هر دو خاک کاملاً یکسان است، ولی درصد رس در خاک A بیشتر از خاک B می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خاک A خمیری‌تر و ریزدانه‌تر است، یعنی حد روانی (LL) آن بیش‌تر از خاک B می‌باشد. از طرف دیگر هر چه خاکی ریزدانه‌تر باشد، حفرات آن هم ریزتر بوده و آب سخت‌تر در آن حرکت و نفوذ می‌کند. پس نفوذپذیری خاک A از خاک B کمتر است و در نهایت گزینهٔ (۱) پاسخ درست این تست خواهد بود.

توجه: هر چه خاک خمیری‌تر باشد، حد روانی (LL) آن بالاتر و حد خمیری‌اش (PL) کمتر است، پس در مقایسهٔ حد خمیری این دو خاک نیز می‌توان گفت که حد خمیری (PL) خاک A کمتر از خاک B است.

۱۱- (۱)

برای پاسخ به این تست در قدم اول ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک را مشخص می‌کنیم که برای این منظور به درصد عبوری از الک $NO\ 200$ توجه کرده و می‌گوییم:

$F_{200} = 60\% > 50\% \Rightarrow$ مقدار ریزدانه در خاک، بیشتر از درشت‌دانه است. $\Rightarrow$ حرف اول خاک C یا M است.

دقت: بدون انجام فرآیند فوق و با توجه به گزینه‌ها هم معلوم بود که خاک ریزدانه است.

در ادامه برای تعیین حرف اول خاک از بین حروف M یا C، به اطلاعات مربوط به حدود اتربرگ در خاک مراجعه کرده و خواهیم داشت:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = LL - PL = 60 - 35 = 25 \\ PI_A = 0/73(LL - 20) = 0/73 \times (60 - 20) = 29/2 \end{cases}$$

$\Rightarrow PI_{\text{موجود}} < PI_A \Rightarrow$ نقطهٔ مربوط به این خاک، در زیر خط A قرار دارد. $\Rightarrow$ حرف اول خاک M می‌باشد.

در انتها نیز برای تعیین حرف دوم خاک مقدار LL را مدنظر قرار می‌دهیم که چون $LL = 60\% > 50\%$ است، حرف دوم خاک H خواهد بود.

پس نام این خاک $\boxed{MH}$ می‌باشد.

۱۲- (۲)

ابتدا باید تعیین کنیم این خاک درشت‌دانه است یا ریزدانه که برای این منظور کافیست تا درصد عبوری از الک ۲۰۰ NO را مشخص نماییم. طبق اطلاعات صورت سؤال وزن دانه‌های درشت‌تر از الک ۲۰۰ NO، ۲۰٪ وزن کل خاک را شامل می‌شوند، بنابراین ۸۰٪ دانه‌های خاک از این الک می‌گذرند و $F_{۲۰۰} = ۸۰٪$ است. پس می‌گوییم:

$F_{۲۰۰} = ۸۰٪ > ۵۰٪ \Rightarrow$ مقدار ریزدانه در خاک، بیشتر از درشت‌دانه است. $\Rightarrow$ حرف اول خاک C یا M است.

البته با توجه به گزینه‌های باقی‌مانده (۲ و ۳)، حرف اول خاک قطعاً C است، اما دلیل کامل این موضوع را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد.

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۳۵ - ۱۵ = ۲۰ > ۷ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳ \times (۳۵ - ۲۰) \simeq ۱۱ \end{cases} \Rightarrow PI_{\text{موجود}} > PI_A$$

$\Rightarrow$ نقطهٔ مربوط به این خاک، بالای خط A قرار می‌گیرد. $\Rightarrow$ حرف اول خاک C خواهد بود.

همچنین حرف دوم این خاک به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$LL = ۳۵٪ < ۵۰٪ \Rightarrow$ حرف دوم خاک L است.

پس نام این خاک $\boxed{CL}$ است.

۱۳- (۴)

با توجه به جدول داده شده، درصد عبوری از الک ۲۰۰ NO، (یعنی دانه‌های خاکی که ریزتر از $۰/۰۷۵\ mm$ هستند) ۶۰٪ می‌باشد و مشابه با دو تست قبلی می‌توان گفت:

$F_{۲۰۰} = ۶۰٪ > ۵۰٪ \Rightarrow$ مقدار ریزدانهٔ خاک بیشتر از درشت‌دانه است. $\Rightarrow$ حرف اول خاک C یا M است.

همچنین برای تعیین دقیق حرف اول خاک و تشخیص رس (C) یا لای (M) بودن آن می‌گوییم:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۷۰ - ۲۵ = ۴۵ > ۷ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳ \times (۷۰ - ۲۰) = ۳۶/۵ \end{cases} \Rightarrow PI_{\text{موجود}} > PI_A$$

$\Rightarrow$ نقطهٔ مربوط به این خاک در بالای خط A قرار دارد. $\Rightarrow$ حرف اول خاک (C) است.

پس گزینهٔ (۴) صحیح است.

توجه: با توجه به $LL = ۷۰٪ > ۵۰٪$، حرف دوم خاک نیز H خواهد بود و نام خاک $\boxed{CH}$ است.

۱۴- (۳)

مشابه با تست‌های قبل، برای نام‌گذاری این خاک ابتدا باید درصد عبوری آن از الک ۲۰۰ NO را مدنظر قرار دهیم تا ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک مشخص گردد. بدین منظور قطر نظیر الک شمارهٔ ۲۰۰ یعنی $d = ۰/۰۷۵\ mm$ را در منحنی مشاهده کرده و درصد متناظر با آن را روی محور قائم قرائت می‌کنیم که برابر است با:

$d = ۰/۰۷۵\ mm \Rightarrow F = ۶۰٪$

یعنی ۶۰٪ ذرات خاک از الک ۲۰۰ NO عبور کرده‌اند و می‌توان گفت:

$F_{۲۰۰} = ۶۰٪ > ۵۰٪ \Rightarrow$ مقدار ریزدانهٔ خاک بیشتر از درشت‌دانه است. $\Rightarrow$ حرف اول خاک C یا M است.

همچنین با توجه به حدود اتربرگ این خاک و به‌صورت دقیق‌تر، حرف اول خاک را به‌صورت زیر مشخص می‌کنیم:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = \text{نشانهٔ خمیری} = ۲۰ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳(۶۰ - ۲۰) = ۲۹/۲ \end{cases} \Rightarrow PI_{\text{موجود}} < PI_A$$

یعنی نقطهٔ مربوط به این خاک، زیر خط A قرار داشته و حرف اول خاک M می‌باشد. در نهایت نیز با توجه به $LL = ۶۰٪ > ۵۰٪$، حرف دوم خاک H بوده و نام این خاک $\boxed{MH}$ می‌باشد.

۱۵- (۳)

ابتدا با توجه به درصد عبوری از الک $NO\ ۲۰۰$، ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک را مشخص می‌کنیم:

$F_{۲۰۰} = ۳\% < ۵۰\%$ ⇐ (درشت‌دانهٔ خاک زیاد است) ⇐ ریزدانهٔ خاک کم است. ⇐ حرف اول خاک G یا S است.

حال برای مشخص نمودن دقیق حرف اول خاک، باید درصد شن و ماسه را با هم مقایسه کنیم که برای این منظور شکل زیر را رسم کرده و مقدار شن و ماسه را روی الک‌ها نشان می‌دهیم:

$NO\ ۴$ | شن | $= ۱۰۰ - NO\ ۴$ درصد عبوری از الک $= ۱۰۰ - ۷۰ = ۳۰\%$

$NO\ ۲۰۰$ | ماسه | $= ۱۰۰ -$ درصد شن $-$ درصد ریزدانه $= ۱۰۰ - ۳۰ - ۳ = ۶۷\%$

Pan | ریزدانه | $= NO\ ۲۰۰$ درصد عبوری از الک $= ۳\%$

واضح است که درصد ماسه (۶۷٪) از درصد شن (۳۰٪) بیشتر بوده و حرف اول خاک S است. از طرفی چون درصد عبوری از الک $NO\ ۲۰۰$، ۳٪ بوده و کمتر از ۵٪ است، بنابراین برای تعیین حرف دوم این خاک، باید کیفیت دانه‌بندی را مدنظر قرار دهیم (خصوصیات خمیری خاک قابل توجه نمی‌باشند). لذا پارامترهای C_c و C_u را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\begin{cases} C_u = \dfrac{D_{۶۰}}{D_{۱۰}} = \dfrac{۳}{۰/۲} = ۱۵ \Rightarrow C_u > ۶ \\[2ex] C_c = \dfrac{D_{۳۰}^{۲}}{D_{۱۰} \times D_{۶۰}} = \dfrac{۱/۲^{۲}}{۰/۲ \times ۳} = ۲/۴ \Rightarrow ۱ < C_c < ۳ \end{cases}$$

یعنی خاک خوب دانه‌بندی شده است و حرف دوم آن W می‌باشد.

پس در نهایت نام این خاک $\boxed{SW}$ خواهد بود.

۱۶- (۴)

چون $F_{۲۰۰} = ۵\% < ۵۰\%$ است، بنابراین خاک مورد نظر درشت‌دانه بوده و حرف اول آن G یا S است که البته این موضوع را در گزینه‌ها نیز می‌توانیم مشاهده کنیم. حال درصد شن و ماسه را به‌صورت زیر محاسبه کرده و با هم مقایسه می‌کنیم:

$NO\ ۴$ | شن | $= NO\ ۴$ درصد مانده روی الک $= ۴۵\%$

$NO\ ۲۰۰$ | ماسه | $= ۱۰۰ -$ درصد شن $-$ درصد ریزدانه $= ۱۰۰ - ۴۵ - ۵ = ۵۰\%$

Pan | ریزدانه | $= NO\ ۲۰۰$ درصد عبوری از الک $= ۵\%$

یعنی درصد ماسه (۵۰٪) از درصد شن (۴۵٪) بیشتر بوده و حرف اول خاک S می‌باشد، پس گزینهٔ (۳) نادرست است. از طرفی درصد عبوری از الک $NO\ ۲۰۰$، ۵٪ بوده و در تعیین حرف دوم خاک، لازم است به کیفیت دانه‌بندی توجه کنیم (حرف دوم خاک W یا P است).

پس گزینه‌های (۱) و (۲) نادرست می‌باشند و فقط گزینه (۴) باقی می‌ماند، یعنی براساس گزینه‌ها نام خاک $\boxed{SW}$ خواهد بود.

توجه: این تست کمی ایراد دارد زیرا خاک با $F_{۲۰۰} = ۵\%$، حد فاصل به حساب می‌آید. به هر حال با توجه به گزینه‌ها، تنها پاسخ (۴) می‌تواند درست باشد.

۱۷- (۳)

ابتدا درصد عبوری از الک $NO\ ۲۰۰$ را مدنظر قرار داده و ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک را مشخص می‌کنیم، هر چند با توجه به گزینه‌ها معلوم است که خاک درشت‌دانه می‌باشد.

$F_{۲۰۰} = ۲۵\% < ۵۰\%$ ⇐ (درشت‌دانهٔ خاک زیاد است) ⇐ ریزدانهٔ خاک کم است. ⇐ حرف اول خاک S یا G است.

حال با مقایسهٔ درصد شن و ماسه، حرف اول خاک را به‌طور دقیق مشخص می‌کنیم. برای این منظور الک‌های زیر را در نظر گرفته و درصد بخش‌های مختلف خاک را روی آن نمایش می‌دهیم:

$NO\ ۴$ | شن | $= ۱۰۰ - NO\ ۴$ درصد عبوری از الک $= ۱۰۰ - ۶۰ = ۴۰\%$

$NO\ ۲۰۰$ | ماسه | $= ۱۰۰ -$ درصد شن $-$ درصد ریزدانه $= ۱۰۰ - ۴۰ - ۲۵ = ۳۵\%$

Pan | ریزدانه | $= NO\ ۲۰۰$ درصد عبوری از الک $= ۲۵\%$

با توجه به آنکه درصد شن (۴۰٪) از درصد ماسه (۳۵٪) بیشتر است، حرف اول خاک G می‌باشد. از طرفی درصد عبوری از الک $NO\ ۲۰۰$، $F_{۲۰۰} = ۲۵\% > ۱۲\%$ است، بنابراین در نامگذاری خاک و تعیین حرف دوم، باید به‌حدود اتربرگ توجه داشته باشیم.

$PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۲۳ - ۲۰ = ۳ < ۴$ ⇐ حرف دوم خاک M می‌باشد

پس نام این خاک $\boxed{GM}$ است.

۱۸- (۴)

ابتدا با استفاده از درصد عبوری از الک $NO\,۲۰۰$،درشت‌دانه یا ریزدانه بودن خاک را مشخص می‌کنیم، اگرچه براساس گزینه‌های موجود معلوم است که خاک درشت‌دانه می‌باشد.

$F_{۲۰۰} = ۸٪ < ۵۰٪ \Rightarrow$ (درشت‌دانهٔ خاک زیاد است) ریزدانهٔ خاک کم است $\Rightarrow$ حرف اول خاک G یا S است.

حال می‌خواهیم حرف اول خاک را به‌طور دقیق معلوم کنیم که برای این منظور درصدهای شن و ماسه را به‌صورت زیر محاسبه کرده و با هم مقایسه می‌کنیم:

$NO\,۴$ | شن | $= ۱۰۰ - F_۴ = ۱۰۰ - ۱۰۰ = ۰٪$ = ۱۰۰ − درصد عبوری از الک $NO\,۴$ =

$NO\,۲۰۰$ | ماسه | $= ۱۰۰ - ۰ - ۸ = ۹۲٪$ = ۱۰۰ − درصد شن − درصد ریزدانه =

Pan | ریزدانه | $= F_{۲۰۰} = ۸٪$

اینکه درصد شن صفر به‌دست آمده است، یعنی اصلاً در این خاک شن وجود ندارد و خاک قطعاً ماسه‌ای است، پس حرف اول خاک S می‌باشد. از طرفی برای تعیین بخش دوم نام‌گذاری خاک، چون $۵٪ < F_{۲۰۰} = ۸٪ < ۱۲٪$ است، خاک دو اسمی بوده و هم دانه‌بندی و هم حدود اتربرگ خاک دارای اهمیت هستند که به‌ترتیب زیر، حرف مربوط به هر قسمت را تعیین می‌کنیم.

دانه‌بندی خاک: با توجه به آنکه $C_c = ۰/۰۱۲ < ۱$ است، خاک بد دانه‌بندی شده به حساب می‌آید و حرف دومِ مربوط به این قسمت، P می‌باشد. پس اسم اول خاک SP خواهد بود. (از همینجا معلوم است که گزینهٔ (۴) صحیح می‌باشد.)

حدود اتربرگ:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = ۸ > ۷ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳(۳۰ - ۲۰) = ۷/۳ \end{cases} \Rightarrow PI_{\text{موجود}} > PI_A$$

یعنی نقطهٔ مربوط به این خاک در بالای خط A قرار دارد و بر این اساس حرف دوم خاک C بوده و اسم دوم خاک SC می‌باشد.

پس در نهایت نام این خاک $\boxed{SP - SC}$ خواهد بود.

۱۹- (۱)

ابتدا مشابه با تست‌های قبل، ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک را تعیین می‌کنیم:

$F_{۲۰۰} = ۱۴٪ < ۵۰٪ \Rightarrow$ (درشت دانهٔ خاک زیاد است) ریزدانهٔ خاک کم است $\Rightarrow$ حرف اول خاک G یا S است.

سپس G یا S بودن حرف اول را به‌طور دقیق مشخص می‌کنیم که برای این‌کار باید درصد شن و ماسهٔ خاک را محاسبه کرده و با هم مقایسه کنیم.

$NO\,۴$ | شن | $= ۱۰۰ - ۹۰ = ۱۰٪$ = ۱۰۰ − درصد عبوری از الک $NO\,۴$ =

$NO\,۲۰۰$ | ماسه | $= ۱۰۰ - ۱۰ - ۱۴ = ۷۶٪$ = ۱۰۰ − درصد شن − درصد ریزدانه =

Pan | ریزدانه | $= F_{۲۰۰} = ۱۴٪$

یعنی درصد ماسه (٪ ۷۶) از درصد شن (٪ ۱۰) بیشتر بوده و حرف اول خاک، S خواهد شد.

حال حرف دوم خاک را تعیین می‌کنیم که چون $F_{۲۰۰} = ۱۴٪ > ۱۲٪$ است، بنابراین حرف دوم براساس حدود اتربرگ تعیین می‌شود. (همین‌جا معلوم می‌شود که گزینهٔ (۱) پاسخ این سؤال می‌باشد.)

$PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۲۰ - ۱۷ = ۳ < ۴ \Rightarrow$ حرف دوم خاک M است.

پس در نهایت نام این خاک $\boxed{SM}$ خواهد بود.

۲۰- (۱)

ابتدا مشابه با تست‌های قبل ریزدانه یا درشت‌دانه بودن خاک را مشخص می‌کنیم، اگرچه با توجه به گزینه‌ها معلوم است که خاک درشت‌دانه می‌باشد.

$F_{۲۰۰} = ۱۰٪ < ۵۰٪ \Rightarrow$ (درشت‌دانهٔ خاک زیاد است) ریزدانهٔ خاک کم است $\Rightarrow$ حرف اول خاک S یا G است.

حال مشخص می‌کنیم حرف اول خاک S است یا G که برای این منظور شکل الک‌ها را رسم کرده و درصد هر بخش خاک را روی آن مشخص می‌کنیم:

$NO\,۴$ | شن | $= ۱۰۰ - F_۴ = ۱۰۰ - ۸۰ = ۲۰٪$

$NO\,۲۰۰$ | ماسه | $= ۱۰۰ - ۲۰ - ۱۰ = ۷۰٪$ = ۱۰۰ − درصد شن − درصد ریزدانه =

Pan | ریزدانه | $= F_{۲۰۰} = ۱۰٪$

چون درصد ماسه (٪۷۰) از درصد شن (٪۲۰) بیشتر است، بنابراین حرف اول خاک S می‌باشد که همهٔ گزینه‌ها به همین شکل هست. (در واقع تا این قسمت می‌توانستیم مسئله را حل نکنیم چون طبق گزینه‌ها واضح بود که حرف اول خاک S است!)

برای تعیین حرف دوم خاک توجه کنید که $٪۵ < F_{۲۰۰} = ٪۱۰ < ٪۱۲$ است، یعنی هم دانه‌بندی و هم حدود اتربرگ در تعیین نام این خاک اهمیت دارند.

دانه‌بندی: ابتدا پارامترهای C_c و C_u را محاسبه می‌کنیم.

$$\begin{cases} C_u = \dfrac{D_{۶۰}}{D_{۱۰}} = \dfrac{۲/۵}{۰/۱} = ۲۵ \Rightarrow C_u > ۶ \\ C_c = \dfrac{D_{۳۰}^{۲}}{D_{۱۰} \times D_{۶۰}} = \dfrac{۰/۶^{۲}}{۰/۱ \times ۲/۵} = ۱/۴۴ \Rightarrow ۳ > C_c > ۱ \end{cases}$$

پس خاک خوب دانه‌بندی شده است و حرف دوم این قسمت، W می‌باشد.

حدود اتربرگ:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = ۶ < ۷ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳ \times (۱۵ - ۲۰) < ۰ \end{cases} \Rightarrow$$
نقطهٔ مربوط به این خاک، بالای خط A است.

از آنجاکه $۴ < PI_{\text{موجود}} < ۷$ می‌باشد، بنابراین نام این قسمت از خاک نیز دو اسمی بوده و به‌صورت $SC - SM$ می‌باشد. پس در نهایت نام این خاک به‌صورت $\boxed{SW - (SC - SM)}$ خواهد بود.

۲۱- (۱)

ابتدا مشابه با تست‌های قبل درشت‌دانه یا ریزدانه بودن خاک را مشخص می‌کنیم.

$F_{۲۰۰} = ٪۶ < ٪۵۰ \Rightarrow$ (درشت‌دانهٔ خاک زیاد است) ریزدانهٔ خاک کم است $\Rightarrow$ حرف اول خاک S یا G است.

حال با مقایسهٔ درصد شن و ماسه، حرف اول را به‌صورت دقیق تعیین می‌کنیم.

$NO\,۴$ | شن | $= ۱۰۰ - NO\,۴$ درصد عبوری از الک $= ۱۰۰ - ۶۳ = ٪۳۷$

$NO\,۲۰۰$ | ماسه | $= ۱۰۰ -$ درصد شن $-$ درصد ریزدانه $= ۱۰۰ - ۳۷ - ۶ = ٪۵۷$

Pan | ریزدانه | $= F_{۲۰۰} = ٪۶$

چون درصد ماسه (٪۵۷) از درصد شن (٪۳۷) بیشتر است، بنابراین حرف اول خاک S می‌باشد. (تا اینجای حل فقط برای تمرین بیشتر محاسبات را انجام داده‌ایم، چرا که حرف اول همهٔ گزینه‌ها S است.)

در محاسبهٔ حرف دوم توجه کنید $٪۵ < F_{۲۰۰} = ٪۶ < ٪۱۲$ است، بنابراین در بخش دوم نام‌گذاری خاک، هم دانه‌بندی و هم حدود اتربرگ مطرح می‌شوند.

دانه‌بندی: $C_u = ۲۳/۵ > ۶$ و $۱ < C_c = ۱/۵ < ۳$ است، بنابراین خاک خوب دانه‌بندی شده است و حرف دوم این قسمت، W می‌باشد.

حدود اتربرگ:

$$\begin{cases} PI_{\text{موجود}} = LL - PL = ۵۵ - ۳۵ = ۲۰ \\ PI_A = ۰/۷۳(LL - ۲۰) = ۰/۷۳ \times (۵۵ - ۲۰) = ۲۵/۵۵ \end{cases} \Rightarrow PI_{\text{موجود}} < PI_A$$

یعنی خاک موردنظر زیر خط A قرار داشته و حرف دوم این قسمت از نام خاک، M می‌باشد.

پس در نهایت نام این خاک $\boxed{SW - SM}$ خواهد بود.

۲۲- (۲)

$$D = K\sqrt{\frac{L}{t}} \Rightarrow ۰/۰۰۶ = ۰/۰۱۲\sqrt{\frac{L}{۳۰}} \Rightarrow L = ۷/۵\,cm$$

۲۳- (۳)

در صورت سؤال $PL=$ ۱۸/۷ داده شده است اما برای محاسبهٔ نشانهٔ خمیری (PI)، بایدحد روانی (LL) را نیز داشته باشیم.

$LL =$ درصد رطوبت به ازاء ۲۵ ضربه $=$ ۳۹/۱
$(N=۲۵)$ طبق جدول

$$PI = LL - PL = ۳۹/۱ - ۱۸/۷ = ۲۰/۴$$

۲۴- (۲)

$$PL = \frac{\sum PL_i}{n} = \frac{۱۸/۳ + ۱۸/۷ + ۱۹/۱}{۳} = ۱۸/۷$$

۲۵- (۱)

حد روانی رطوبتی از خاک است که به ازای آن با ۲۵ ضربه در آزمایش حد روانی، شیار استاندارد بسته می‌شود. حال چون هر ضربه معادل ۰/۹ gr/cm^2 تنش برشی به خاک اعمال می‌کند، پس مقاومت برشی خاک در حد روانی برابر می‌شود با:

$$۲۵ \times ۰/۹ = ۲۲/۵\ gr/cm^2$$

فصل ۳: تراکم خاک

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

در فصل قبل با اجزاء خاک آشـنا شدیم و فهمیدیم که جزء اصلی در مقاومت خاک، دانه‌های جامد آن می‌باشـند. برای مقاوم‌تر کردن خـاک باید تا حد امکان دانه‌های جامد به هم نزدیک شوند و فضای خالی خاک کمتر گردد تا در یک حجم مشخص، دانه‌های جامد بیشـتری داشـته باشـیم. واضح است که در این شـرایط با افزایش دانه‌های جامد در یک حجم مشخص (که مقاومت خاک به عهدهٔ آنهاست) مقاومت خاک زیاد می‌شود.

امـا چگونـه می‌توان دانه‌های جامـد خاک در یک حجم مشـخص را زیاد کرد؟ در پاسخ باید بگوییم که این اتفاق با عمل تراکم رخ می‌دهد و طی آن با صرف انرژی، دانه‌های جامد خاک به هم نزدیک شـده و هوای موجود در خاک به بیرون فرستاده می‌شود.

مـا در این فصل قصد داریم تا بحث تراکم خاک را به‌طور کامل مورد بررسـی قرار دهیم که قسمت‌های مختلف آن مطابق با نمودار درختی زیر است:

تراکم خاک
- قسمت اول: مفهوم تراکم، آزمایش تراکم و تفسیر نتایج آن
- قسمت دوم: مفهوم درصد تراکم و حل مسائل اجرایی تراکم
- قسمت سوم: مباحث تکمیلی تراکم خاک

قسمت اول: مفهوم تراکم، آزمایش تراکم و تفسیر نتایج آن

زیر شاخه‌های قسمت اول

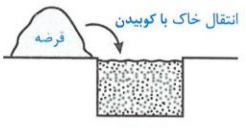
A-۱- مفهوم تراکم

A-۲- روند کلی آزمایش تراکم و تفسیر نتایج آن

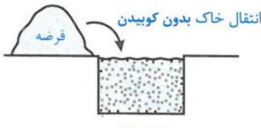
A-۳- عوامل مؤثر بر تراکم

A-۱- مفهوم تراکم

برای شروع بحث، شکل‌های زیر را در نظر بگیرید که در آنها قرار است یک گودال توسط خاک قرضه پر شود.



شکل (۲)



شکل (۱)

با نگاه کردن به این دو شکل، به‌سادگی می‌توان فهمید که در شکل (۲)، خاک بیشتری را می‌توانیم در گودال جای دهیم. در این حالت (یعنی شکل ۲) با اعمال انرژی به خاکِ ریخته شده در گودال، کار انجام می‌شود که این کار نزدیک کردن دانه‌های جامد به هم و بیرون فرستادن هواست. این مثال ساده، مفهوم تراکم خاک است که با جمع‌بندی مطالب مربوط به آن، به‌طور دقیق‌تر می‌توان گفت:

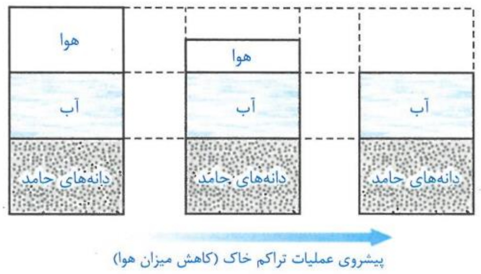
> تراکم خاک به عملیاتی گفته می‌شود که طی آن با فشرده کردن خاک، هوای موجود در فضای خالی خاک خارج شده و در نتیجه حجم فضای خالی، کاهش می‌یابد. در طی عملیات تراکم، انرژی وارد خاک می‌گردد و کار انجام می‌شود. این کار به‌صورت نزدیک کردن دانه‌های جامد به هم و بیرون فرستادن هوا انجام می‌شود.

در ادامه با طرح چند سؤال، مفهوم تراکم و ویژگی‌های آن را بیشتر درک می‌کنیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: با ترسیم دیاگرام سه فازی در حالت‌های مختلف، چگونه می‌توان تراکم خاک را نشان داد؟

پاسخ:



سؤال ۲: با توجه به سؤال قبل، طی عملیات تراکم، پارامترهای V ، e و γ_d چگونه تغییر می‌کنند؟

پاسخ: با توجه به شکل مشخص است که در حین تراکم خاک:

۱- حجم و وزن دانه‌های جامد (W_s , V_s) ثابت بوده و تغییر نمی‌کند.

۲- حجم هوا (V_a) کاهش می‌یابد و باعث کاهش حجم فضای خالی (V_v) می‌گردد.

حال می‌توان در مورد تغییرات پارامترهای گفته شده در حین تراکم اظهارنظر کرد:

$V = V_v + V_s$ (V_s: ثابت، V_v: کاهش) ⇐ V کاهش می‌یابد.   ، $e = \dfrac{V_v}{V_s}$ (V_v: کاهش، V_s: ثابت) ⇐ e کاهش می‌یابد.

$\gamma_d = \dfrac{W_s}{V}$ (W_s: ثابت، V: کاهش) ⇐ γ_d زیاد می‌شود.

تذکر: با افزایش تراکم اگر میزان آب را ثابت نگه داشته باشیم، درجه اشباع خاک (S_r) افزایش می‌یابد، زیرا:

$$S_r = \frac{V_w \ (\text{ثابت})}{V_v \ (\text{کاهش})} \Rightarrow \text{افزایش می‌یابد.} \ S_r$$

سؤال ۳: به‌نظر شما کدام‌یک از وزن مخصوص‌های طبیعی و خشک، ملاک مقاومت خاک می‌باشند؟ چرا؟

● پاسخ: طبق آنچه در فصل اول یاد گرفتیم، وزن مخصوص طبیعی یک خاک، از حاصل تقسیم وزن کل آن (شامل دانه‌های جامد و آب) بر حجم تودهٔ خاک به‌دست می‌آید، حال آنکه وزن مخصوص خشک همین خاک، حاصل تقسیم وزن دانه‌های جامد بر حجم تودهٔ خاک است. از طرفی می‌دانیم مقاومت خاک به عهدهٔ دانه‌های جامد بوده و آب نقشی در تحمل مقاومت ندارد. پس می‌توان گفت این وزن مخصوص خشک خاک (γ_d) است که ملاک مقاومت خاک می‌باشد.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad , \quad \gamma = \frac{W_s + W_w \ (\text{نقشی در مقاومت ندارد.})}{V}$$

سؤال ۴: اثرات مثبت و منفی تراکم در خاک‌ها کدامند؟

● پاسخ: همانطورکه دیدید در اثر تراکم حجم فضای خالی خاک کاهش پیدا می‌کند و فشردگی دانه‌های جامد بیشتر می‌شود، در نتیجه مقاومت خاک افزایش پیدا کرده و نشست آن به هنگام بارگذاری کاهش می‌یابد که این موارد، مهمترین اثرات مثبت تراکم هستند. از طرف دیگر با کاهش حجم فضای خالی خاک، در صورت پر آب بودن خاک، در هنگام یخبندان و در اثر افزایش حجم آب ناشی از یخ زدن، تودهٔ خاک متورم شده و باد می‌کند. بنابراین می‌توان گفت تراکم خاک باعث افزایش پتانسیل تورم خاک‌ها به‌هنگام یخبندان می‌شود که پدیدهٔ مطلوبی نیست.

سؤال ۵: بهترین تراکم خاک چه موقع اتفاق می‌افتد؟

● پاسخ: بهترین حالت تراکم وقتی اتفاق می‌افتد که همهٔ هوای خاک خارج شده و خاک اشباع گردد ($S_r = ۱$). در این حالت رابطهٔ وزن مخصوص خشک خاک به‌صورت زیر در می‌آید که به آن $\gamma_{d_{zav}}$ (هوا صفر = *zero air void*) می‌گوییم:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} \xrightarrow[e=\omega G_s]{S_r=1} \boxed{\gamma_{d_{zav}} = \frac{G_s \gamma_w}{1+\omega G_s}}$$

تذکر: در عمل رسیدن به $\gamma_{d_{zav}}$ بسیار دشوار است، ولی ما می‌توانیم به‌جای آن پارامتری به نام $\gamma_{d_{max}}$ را ملاک کار قرار دهیم که از آزمایش تراکم به‌دست می‌آید.

در ادامهٔ بحث، در مورد روند کلی آزمایش تراکم و مفهوم این پارامتر بیشتر صحبت خواهیم کرد ولی قبل از آن به تمرین زیر پاسخ دهید:

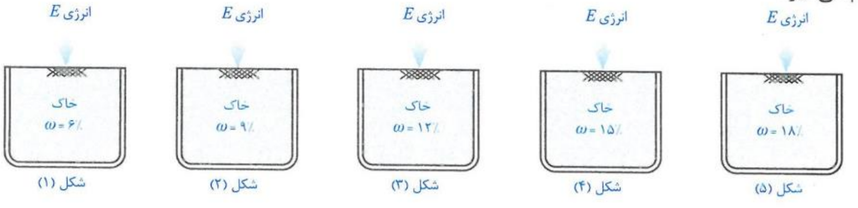
تمرین ۱: تراکم خاک به عملیاتی گفته می‌شود که طی آن .... خاک بیرون رانده می‌شود و .... افزایش می‌یابد.

۱) هوای - نسبت تخلخل
۲) آب مازاد - وزن مخصوص خشک خاک
۳) هوای - وزن مخصوص خشک خاک
۴) آب مازاد - نسبت تخلخل

● حل: با توجه به مطالب گفته شده در متن درس، گزینه (۳) درست است.

A-۲- روند کلی آزمایش تراکم و تفسیر نتایج آن

شکل‌های زیر را در نظر بگیرید که پنج ظرف (یا قالب) با حجم مشخص را نشان می‌دهند و قرار است در آنها یک نوع خاک با رطوبت‌های مختلف ریخته شده و با اعمال انرژی‌های یکسان کوبیده و متراکم گردند. این کوبیدن و اعمال انرژی از طریق رهاسازی وزنه‌ای با جرم مشخص و از یک ارتفاع معلوم انجام می‌گیرد.

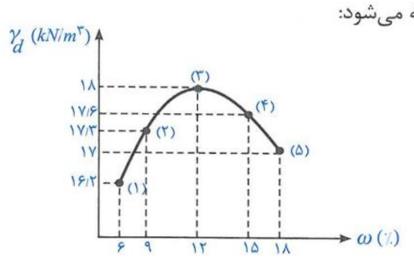


شکل (۵) شکل (۴) شکل (۳) شکل (۲) شکل (۱)

حال فرض کنید که پس از کوبیدن و متراکم کردن این خاک‌ها و اندازه‌گیری وزن مخصوص خشک هر یک از آنها، نتایج زیر حاصل شده است:

	خاک (۱)	خاک (۲)	خاک (۳)	خاک (۴)	خاک (۵)
ω (٪)	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۸
γ_d (kN/m^3)	۱۶/۲	۱۷/۳	۱۸	۱۷/۶	۱۷

که فرم ترسیمی اعداد و ارقام فوق، مطابق شکل زیر خواهد بود و به آن **منحنی تراکم** گفته می‌شود:



مجموعهٔ عملیاتی که بر روی نمونه خاک‌های (۱) تا (۵) انجام دادیم، در واقع روند کلی **آزمایش تراکم** را نشان می‌دهد. متداول‌ترین شکل از آزمایش تراکم، آزمایش تراکم استاندارد است که در آن حجم قالب حدود $1000\,cm^3$ بوده و انرژی تراکم نیز تقریباً ۵۵۰ کیلو ژول بر مترمکعب می‌باشد که به‌طور مفصل در قسمت تکمیلی، این آزمایش را شرح می‌دهیم.

در ادامه می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، فلسفهٔ این آزمایش را بیشتر درک کرده و مطالب مفیدی را از آن یاد بگیریم:

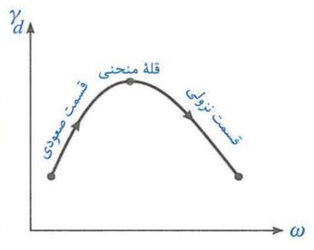
بررسی چند سؤال

سؤال ۱: اصولاً نقش آب به هنگام تراکم خاک چیست؟

پاسخ: در رطوبت‌های کم، آب باعث می‌شود تا اصطکاک بین ذرات خاکِ دانه‌ای کم شده و پیوند بین ذرات رسی نیز شل شود، یعنی آب یک نقش روان‌کننده داشته و اصطلاحاً باعث روغن‌کاری ذرات می‌شود. پس در این شرایط آب به تراکم خاک کمک می‌کند. اما در طرف مقابل چنانچه مقدار آب از یک میزان مشخصی بیشتر شود، اولاً مقداری از انرژی تراکم را گرفته و مستهلک می‌کند، ثانیاً فضای خالی را پر کرده و مانع تراکم بیشتر می‌گردد. پس در این شرایط آب یک نقش ممانعت کننده در برابر تراکم دارد.

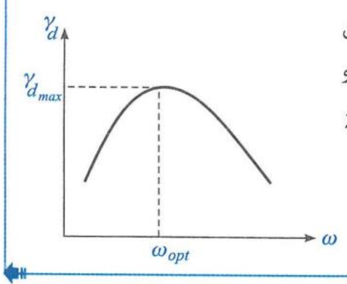
سؤال ۲: با توجه به سؤال قبل، روند کلی منحنی تراکم را چگونه تفسیر می‌کنید؟

پاسخ: با رطوبت‌های کم، آب در نقش روغن‌کاری بین ذرات ظاهر می‌شود و به تراکم خاک کمک می‌کند، به‌همین دلیل هر چقدر آب را زیادتر کنیم، روغنکاری نیز بهتر انجام می‌شود و تراکم بیشتری نیز خواهیم داشت که این موضوع باعث می‌شود تا منحنی تراکم ابتدا به‌صورت صعودی باشد (با افزایش رطوبت، γ_d بیشتر می‌شود و این یعنی تراکم بیشتر ذرات خاک). در ادامه و از یک جایی به بعد دیگر افزایش رطوبت باعث افزایش تراکم نمی‌شود، زیرا نقش ممانعت‌کننده آب در برابر تراکم ظاهر خواهد شد. به همین دلیل منحنی تراکم یک قسمت نزولی نیز خواهد داشت (با افزایش رطوبت، γ_d کم می‌شود و این یعنی تراکم کمتر ذرات خاک)



سؤال ۳: به نظر شما قلهٔ منحنی تراکم چه چیزی را نشان می‌دهد؟

پاسخ: قلهٔ منحنی تراکم نقطه‌ای را نشان می‌دهد که در آن به ازای یک رطوبت مشخص، وزن مخصوص خشک خاک، حداکثر شده است. این رطوبت مشخص، **رطوبت بهینه** نام دارد (ω_{opt}) و هدف از انجام آزمایش تراکم، یافتن این رطوبت و وزن مخصوص خشک نظیر آن یعنی $\gamma_{d_{max}}$ است.

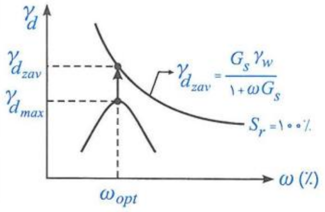


در بیان یک مفهوم دقیق‌تر از رطوبت بهینه می‌توان گفت:

رطوبت بهینه، رطوبتی است که به‌ازای آن خاک بهترین تراکم را دارد، یعنی انرژی خارجی اعمال شده به خاک با بیشترین راندمان در خاک کار انجام می‌دهد و کمترین اتلاف انرژی را داریم. طبیعی است که در مقایسه با سایر رطوبت‌ها (البته در انرژی یکسان)، به‌ازای ω_{opt} بایستی دانه‌های جامد بیشتر به هم نزدیک شده باشند، یعنی وزن مخصوص خشک خاک حداکثر خواهد بود.

سؤال ۴: بسیاری از دانشجویان تصور می‌کنند که $\gamma_{d_{max}}$، بیشترین وزن مخصوص خشکی است که یک خاک می‌تواند داشته باشد، به نظر شما این تصور درست است؟ چرا؟

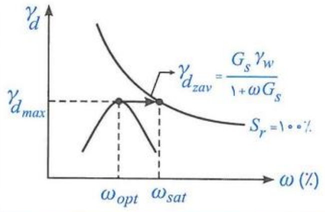
پاسخ: $\gamma_{d_{max}}$ در واقع بیشترین γ_d خاک به‌ازای یک انرژی مشخص می‌باشد و اگر ما بتوانیم انرژی بیشتری به خاک اعمال کنیم، در آن‌صورت وزن مخصوص خشک خاک افزایش یافته و در نهایت از $\gamma_{d_{max}}$ به $\gamma_{d_{zav}}$ می‌رسد.



تذکر: منحنی مربوط به $\gamma_{d_{zav}}$ که با $S_r = 100\%$ مشخص شده است، منحنی اشباع ۱۰۰ درصد یا منحنی هوا - صفر و یا به اختصار منحنی zav نامیده می‌شود که برای یک نوع خاک با تودهٔ ویژهٔ مشخص (G_s ثابت) رسم شده است.

سؤال ۵: همانطور که در سؤال قبل ملاحظه کردید، با صرف انرژی بیشتر، می‌توانیم بدون تغییر در میزان رطوبت، خاک را اشباع کنیم. به نظر شما آیا می‌توان بدون صرف انرژی هم خاک را اشباع کرد؟

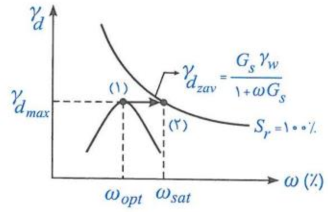
پاسخ: بله، برای این منظور فقط کافی است تا به خاک آب اضافه کنید تا اشباع شود. دقت کنید که در این حالت، حجم، نسبت تخلخل و وزن مخصوص خشک خاک در اثر اشباع شدن با آب تغییر نمی‌کنند و ثابت هستند.



تمرین ۲: با انجام آزمایش تراکم برروی یک خاک مقادیر درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم به‌ترتیب ٪۵ و $2\,t/m^3$ به‌دست آمده است. مقدار اضافه رطوبت لازم برای اشباع کردن نمونه در درصد رطوبت آن چه میزان است؟ ($G_s = 2/5$) (سراسری - ۸۵)

۱) ۲/۵ درصد ۲) ۵ درصد ۳) ۷/۵ درصد ۴) ۱۰ درصد

حل: چون در این سؤال، فقط اضافه کردن آب باعث اشباع شدن خاک می‌شود، بنابراین وزن مخصوص خشک خاک ثابت بوده و منحنی ما به‌صورت شکل مقابل خواهد بود:



در ادامه با قرار دادن مختصات نقطه (۲) در معادله منحنی اشباع ٪۱۰۰ خواهیم داشت:

$$2 = \frac{2/5 \times 1}{1+\omega_{sat} \times 2/5} \Rightarrow \omega_{sat} = 0/1 = 10\%$$

$$\Rightarrow \Delta\omega = \omega_{sat} - \omega_{opt} = 10\% - 5\% = 5\%$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

تمرین ۳: در یک نمونه خاک پس از انجام آزمایش تراکم و تعیین $\gamma_{d_{max}}$، نسبت $(\frac{\gamma_{d_{max}}}{\gamma_{d_{zav}}})$ در درصد رطوبت ثابت، برابر کدام‌یک از گزینه‌های زیر خواهد بود؟

۱) $1+A$ ۲) $1-A$ ۳) $1+\frac{1}{2}A$ ۴) $1-\frac{1}{2}A$

● برای پاسخ به این سؤال، با توجه به اینکه در گزینه‌ها از پارامتر درصد هوا (A) استفاده شده است، سعی می‌کنیم تا رابطهٔ $\gamma_{d_{max}}$ را به نحوی به A مرتبط کنیم. از این‌رو از رابطه زیر که در فصل اول یاد گرفتیم، استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$A = n(1-S_r) = \frac{e}{1+e}(1-S_r) \Rightarrow A + eA = e - \underbrace{eS_r}_{\omega G_s} \Rightarrow e = \frac{A+\omega G_s}{1-A}$$

حال مقدار به‌دست آمده برای e را در رابطه $\gamma_{d_{max}}$ جایگذاری کرده و خواهیم داشت:

$$\gamma_{d_{max}} = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+e} = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+[\frac{A+\omega G_s}{1-A}]} = \frac{G_s\,\gamma_w\,(1-A)}{1-A+A+\omega G_s} = \frac{G_s\,(1-A)\,\gamma_w}{1+\omega G_s}$$

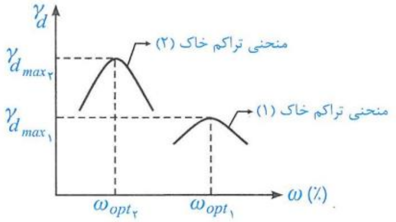
و در نهایت، نسبت خواسته شده در این تست برابر است با:

$$\frac{\gamma_{d_{max}}}{\gamma_{d_{zav}}} = \frac{\frac{G_s\,(1-A)\,\gamma_w}{1+\omega G_s}}{\frac{G_s\,\gamma_w}{1+\omega G_s}} = 1-A$$

یعنی گزینهٔ (۲) درست است.

A-۳- عوامل موثر بر تراکم

برای شروع این بحث ابتدا باید بدانیم که منظور از تراکم بهتر (تراکم بالاتر) در یک خاک چیست و با چه رویکردی می‌توان بـه تـراکم بهتـر رسید؟ منظور از تراکم بهتر در یک خاک آن است که با رطوبت کمتری بتوانیم وزن مخصوص خشک بیشتری داشته باشیم. ایـن موضـوع را می‌توان با استفاده از منحنی‌های تراکم به‌صورت زیر نشان داد:



خاک (۲) تراکم بهتری نسبت به خاک (۱) دارد و می‌توان گفت:

$\gamma_{d_{max_2}} > \gamma_{d_{max_1}}$, $\omega_{opt_2} < \omega_{opt_1}$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید هر چه تراکم خاک بهتر باشد، منحنی تراکم آن به سمت چپ و بالاتر حرکت کرده و جمع‌تر می‌شود.

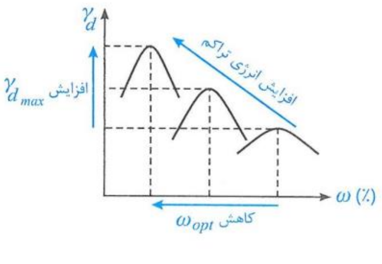
حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که چه عواملی می‌توانند باعث بهتر یا بدتر شدن تراکم شوند؟ در پاسخ به این سؤال باید بگوییم که دو عامل زیر، عوامل موثر در تراکم خاک‌ها هستند:

۱) انرژی تراکم **۲) نوع خاک**

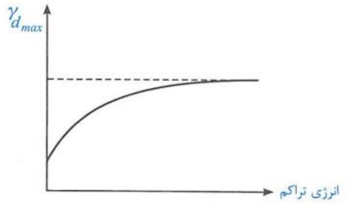
ما در ادامه می‌خواهیم تأثیر این عوامل بر تراکم خاک‌ها را بررسی کنیم:

۱- انرژی تراکم

اگر در یک نوع خاک مشخص انرژی تراکم بیشتر شود، طبیعتاً کار بیـشتری نیـز انجـام خواهد شد که نتیجهٔ آن، تراکم بهتر خاک خواهد بود. پس با توجه به مفهوم تراکم بهتر، می‌توان منحنی‌های تراکم برای انرژی‌های مختلف از یک نوع خاک را بـه‌صـورت مقابـل نشان داد:



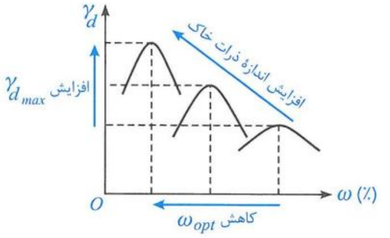
سؤال: آیا هر چقدر انرژی تراکم را افزایش دهیم، تراکم خاک بهتر می‌شود؟



● پاسخ: با افزایش انرژی تراکم، وزن مخصوص خشک خاک به‌صورت شکل مقابل افزایش می‌یابد ولی این افزایش تا یک حد مشخص ادامه دارد و بعد از آن $\gamma_{d_{max}}$ ثابت می‌ماند. پس در یک کار عملی، تعداد رفت و برگشت‌های غلتک نباید از یک مقدار مشخص بیشتر باشد، زیرا مفید واقع نمی‌شود و غیر اقتصادی خواهد بود.

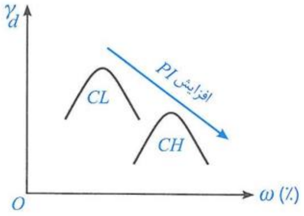
۲- نوع خاک

در خاک‌های دانه‌ای عمل تراکم با جابه‌جایی دانه‌ها بر روی هم و درهم فرورفتن آنها انجام می‌شود، در حالی‌که در خاک‌های رسی عمل تراکم با شکسته شدن پیوند رس‌ها و بعضاً شکستن صفحات رس در فشارهای زیاد اتفاق می‌افتد. حال که با مکانیزم تراکم در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده آشنا شدید، ممکن است از خود بپرسید که تراکم کدام‌یک بهتر است؟ در پاسخ به این سؤال باید بگوییم که ریزدانه‌ها سطح جانبی بیشتری در مقایسه با درشت‌دانه‌ها دارند. بنابراین برای آغشته کردن آنها به آب و کاهش اصطکاک، نیاز به رطوبت بیشتری است و این رطوبت بیشتر، فضای زیادتری از فضای خالی خاک را اشغال کرده و مانع تراکم بیشتر خاک می‌شود. پس هر چه خاک درشت‌دانه‌تر باشد، تراکم آن بهتر است.



منحنی‌های روبرو، تراکم درشت‌دانه‌ها و ریزدانه‌ها را در یک انرژی تراکم ثابت با هم مقایسه می‌کند.

سؤال ۱: به نظر شما در خاک‌های رسی، خاصیت خمیری (که با PI سنجیده می‌شود) چه تأثیری بر تراکم خاک خواهد داشت؟



● پاسخ: هر چقدر خاک رس خمیری‌تر بوده و PI بزرگتری داشته باشد، LL آن بزرگتر و PL آن کوچکتر خواهد بود. کوچکتر بودن PL به این معنی است که خاک رس با آب کمی چسبناک و خمیری می‌شود، پس عملاً ممکن است آبی که به قصد روغنکاری و کاهش اصطکاک بین ذرات به رس اضافه شده است، به چسب زودهنگامی تبدیل شود که می‌خواهد جلوی تراکم را بگیرد. از این‌رو می‌توان گفت هر چقدر نشانهٔ خمیری خاک رس بیشتر باشد، تراکم آن بدتر خواهد بود. برای درک بهتر این موضوع به شکل مقابل دقت کنید:

سؤال ۲: کیفیت دانه‌بندی خاک چه تأثیری بر تراکم آن دارد؟

● پاسخ: هر چقدر دانه‌بندی خاک بهتر باشد، تراکم خاک نیز بهتر صورت می‌گیرد. پس با توجه به نوع خاک می‌توان گفت GW بهترین تراکم را در میان خاک‌ها دارد.

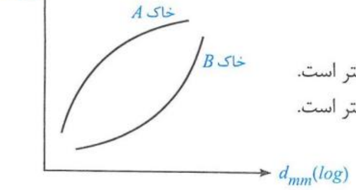
در ادامه با حل چند تمرین، بحث فوق را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۴: تراکم خاک عملی است که طی آن: (سراسری – ۷۸)

۱) آب مازاد خاک بیرون رانده می‌شود و با افزایش انرژی تراکم، از مقدار رطوبت بهینه کاسته می‌شود.
۲) آب و هوای خاک بیرون رانده می‌شود و با افزایش انرژی تراکم، رطوبت بهینه تغییری نمی‌کند.
۳) هوای خاک بیرون رانده می‌شود و با افزایش انرژی تراکم بر مقدار رطوبت بهینه نیز افزوده می‌شود.
۴) هوای خاک بیرون رانده می‌شود و با افزایش انرژی تراکم از مقدار رطوبت بهینه کاسته می‌شود.

● حل: همانطورکه می‌دانید طی عمل تراکم هوای خاک بیرون رانده می‌شود و با افزایش انرژی تراکم، به تراکم بهتری می‌رسیم. تراکم بهتر نیز به معنی کم شدن رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک است. با این توضیحات واضح است که گزینه (۴) پاسخ درست این تست است.

تمرین ۵: اگر منحنی دانه‌بندی دو خاک A و B به‌صورت زیر باشد، در آن‌صورت در مورد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک این دو خاک چگونه اظهار نظر می‌کنید؟



۱) رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک A از خاک B بیشتر است.
۲) رطوبت بهینه خاک A بیشتر از خاک B است ولی حداکثر وزن مخصوص خشک آن از خاک B کمتر است.
۳) رطوبت بهینه خاک A کمتر از خاک B است ولی حداکثر وزن مخصوص خشک آن از خاک B بیشتر است.
۴) رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک A از خاک B کمتر است.

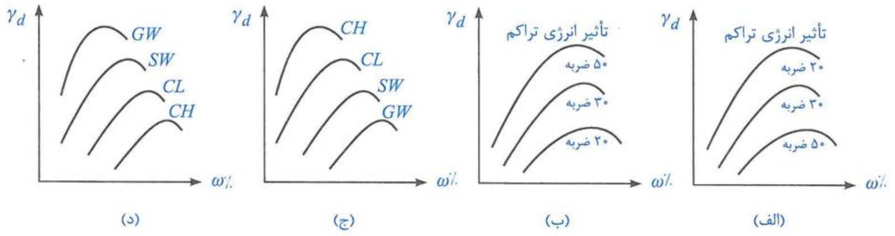
● حل: منحنی دانه‌بندی خاک A به‌صورت محدب و منحنی دانه‌بندی خاک B مقعر می‌باشد، بنابراین خاک B درشت‌دانه‌تر از خاک A بوده و تراکم بهتری دارد. از این‌رو می‌توان گفت:

الف) رطوبت بهینهٔ خاک A بیشتر از رطوبت بهینهٔ خاک B است.

ب) حداکثر وزن مخصوص خشک خاک A کمتر از حداکثر وزن مخصوص خشک خاک B است.

بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۶: تأثیر نوع خاک و انرژی تراکم بر منحنی تراکم، در کدام شکل صحیح است؟ (سراسری - ۹۲)



۱) شکل‌های الف و د ۲) شکل‌های الف و ج ۳) شکل‌های ب و ج ۴) شکل‌های ب و د

● حل: با توجه به شکل‌های داده شده در صورت سؤال می‌توان گفت:

۱- هر چقدر تعداد ضربات وارد به خاک (جهت متراکم کردن آن) بیشتر باشد، انرژی تراکم بیشتر بوده و تراکم خاک بهتر است، پس منحنی به سمت بالا و چپ حرکت می‌کند و این یعنی شکل (ب) درست و شکل (الف) نادرست است.

۲- هرچقدر خاک درشت‌دانه‌تر باشد، تراکم آن بهتر بوده و منحنی تراکم به سمت بالا و چپ حرکت می‌کند، پس شکل (د) درست بوده و شکل (ج) نادرست است.

نتیجه: شکل‌های (ب) و (د) درست هستند و گزینهٔ (۴) پاسخ درست این تست است.

قسمت دوم: مفهوم درصد تراکم و حل مسائل اجرایی تراکم

B-۱- مفهوم درصد تراکم و محاسبهٔ γ_d اجرایی

همانطورکه در قسمت قبل دیدید، با استفاده از آزمایش تراکم، مقادیر ω_{opt} و $\gamma_{d_{max}}$ برای یک خاک تعیین می‌گردند و قاعدتاً پیمانکار موظف است تا رسیدن به $\gamma_{d_{max}}$، خاک را کوبیده و متراکم کند. اما در عمل γ_d اجرایی در کارگاه همیشه با $\gamma_{d_{max}}$ به‌دست آمده از آزمایشگاه یکی نیست. در این شرایط برای مقایسهٔ این دو وزن مخصوص خشک، از پارامتری به نام **درصد تراکم** استفاده می‌شود که آن را با **RC** نشان می‌دهیم و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RC = \frac{\gamma_d \text{ اجرایی در کارگاه}}{\gamma_{d_{max}} \text{ آزمایشگاه}}$$

مقدار RC توسط کارفرما و گروه مهندسین مشاور تعیین شده و برای اجرا به پیمانکار ابلاغ می‌شود تا وی بر این اساس، γ_d اجرایی در کارگاه را به‌صورت زیر محاسبه کرده و آنقدر خاک را متراکم کند تا به مقدار مذکور برسد:

$$\gamma_{d\,\text{اجرایی}} = \gamma_{d_{max}} \times RC$$

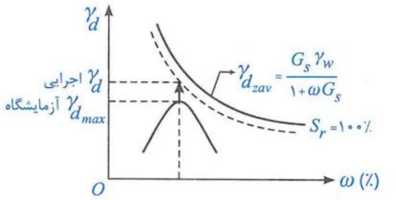
برای روشن شدن موضوع از یک مثال استفاده می‌کنیم:

فرض کنید حداکثر وزن مخصوص خشک یک خاک در آزمایشگاه برابر ۲۰ کیلونیوتن بر متر مکعب به‌دست آمده است و می‌خواهیم این خاک را در کارگاه تا ۹۰ درصد تراکم آزمایشگاه بکوبیم. در این‌صورت وزن مخصوص خشک اجرایی این خاک در کارگاه برابر است با:

$$\gamma_{d\,\text{اجرایی}} = \gamma_{d_{max}} \times RC = ۲۰ \times ۰/۹ = ۱۸\ kN/m^۳$$

سؤال: آیا درصد تراکم RC می‌توان از ٪۱۰۰ هم بیشتر شود؟

● پاسخ: بله اگر خاک در وزن مخصوص خشک $\gamma_{d_{max}}$ اشباع نباشد، این امکان وجود دارد که با صرف انرژی بیشتر، وزن مخصوص خشک خاک را از $\gamma_{d_{max}}$ بیشتر کرده و به $\gamma_{d_{zav}}$ نزدیک کنیم. در این شرایط چون $\gamma_{d\,\text{اجرایی}}$ بزرگتر از $\gamma_{d_{max}}$ آزمایشگاه می‌شود، واضح است که $RC > ۱۰۰٪$ خواهد بود.



$RC > ۱۰۰٪$

تمرین ۷: نتایج آزمایشگاه تراکم استاندارد برای یک نمونه خاک به شرح جدول زیر است:

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ω (٪)	۶	۹	۱۲	۱۵	۱۶	۱۸
γ_d $(kN/m^۳)$	۱۶	۱۶/۳	۱۷/۱	۱۸	۱۷/۶	۱۷

الف) وزن مخصوص خشک خاک و میزان رطوبت آن در ۹۵ درصد تراکم استاندارد را به‌دست آورید.

ب) درجه اشباع خاک در رطوبت بهینه را با فرض $G_s = ۲/۷$ و $\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳$، محاسبه کنید.

زیر شاخه‌های قسمت دوم

B-۱- مفهوم درصد تراکم و محاسبهٔ γ_d اجرایی

B-۲- حل مسائل اجرایی تراکم

پاسخ

الف) با توجه به اطلاعات داده شده در جدول، بیشترین وزن مخصوص خشک برابر $۱۸\ kN/m^۳$ است که همان $\gamma_{d_{max}}$ می‌باشد و رطوبت نظیر آن که ٪۱۵ است، رطوبت بهینه یعنی ω_{opt} می‌باشد. حال برای محاسبه وزن مخصوص خشک در ۹۵ درصد تراکم استاندارد (یعنی $RC=۹۵٪$) خواهیم داشت:

$$\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}=\gamma_{d_{max}}\times RC=۱۸\times ۰/۹۵=۱۷/۱\ kN/m^۳$$

اما برای محاسبهٔ رطوبت در ۹۵ درصد تراکم استاندارد باید رطوبت نظیر γ_d به‌دست آمده در بالا را لحاظ کنیم که طبق جدول داده شده برابر $\omega=۱۲٪$ می‌باشد. این یعنی پیمانکار باید رطوبت خاک در محل اجرای پروژه را ٪۱۲ تنظیم کند.

ب) برای محاسبهٔ درجهٔ اشباع خاک در رطوبت بهینه می‌نویسیم:

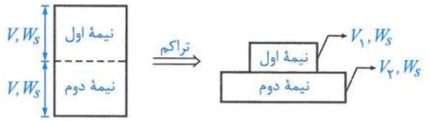
$$\gamma_d=\frac{G_s\,\gamma_w}{1+e}\xrightarrow{\gamma_d=\gamma_{d_{max}}=۱۸\ kN/m^۳}۱۸=\frac{۲/۷\times ۱۰}{1+e}\Rightarrow e=۰/۵$$

$$\omega\,G_s=S_r\,e\xrightarrow{\omega=\omega_{opt}=۱۵٪}۰/۱۵\times ۲/۷=S_r\times ۰/۵\Rightarrow S_r=۰/۸۱\ \text{یا}\ ۸۱٪$$

تمرین ۸: یک نمونه خاک با درصد رطوبت معین را به دو قسمت مساوی تقسیم و نیمهٔ اول را (با رطوبت موجود) به روش تراکم استاندارد به میزان ٪۱۰۰ متراکم می‌کنیم و نیمه دوم را به میزان ٪۸۰ تراکم استاندارد می‌کوبیم. میانگین درصد تراکم کل نمونهٔ خاک (درصورتی‌که همگن فرض شود) چیست؟ (سراسری - ۸۴)

۱) ٪۸۹ ۲) ٪۹۰ ۳) ٪۹۱ ۴) هیچکدام

پاسخ ابتدا شکل شماتیک خاک را قبل و بعد از متراکم شدن ترسیم می‌کنیم. همانطورکه ملاحظه می‌کنید بعد از متراکم شدن، وزن خشک هر نیمه ثابت بوده و تغییر نمی‌کند، ولی حجم آنها بسته به درصد تراکمشان تغییر می‌کند:



با توجه به درصد تراکم هر نیمه، رابطهٔ حجم‌های $V_۱$ و $V_۲$ با هم را می‌یابیم:

$$\begin{cases}\text{نیمه اول}\Rightarrow RC_۱=۱۰۰٪\Rightarrow \gamma_{d_۱}=\gamma_{d_{max}}\\ \text{نیمه دوم}\Rightarrow RC_۲=۸۰٪\Rightarrow \gamma_{d_۲}=۰/۸\,\gamma_{d_{max}}\end{cases}\Rightarrow \gamma_{d_۲}=۰/۸\,\gamma_{d_۱}\Rightarrow \frac{W_s}{V_۲}=۰/۸\times\frac{W_s}{V_۱}\Rightarrow V_۲=۱/۲۵V_۱$$

حال برای محاسبهٔ درصد تراکم نمونهٔمتراکم شده، در قدم اول مقدار $\gamma_{d_{\text{کل}}}$ را برای خاک متراکم شده محاسبه می‌کنیم:

$$\gamma_{d_{\text{کل}}}=\frac{W_{s_{\text{کل}}}}{V_{\text{کل}}}=\frac{W_{s_۱}+W_{s_۲}}{V_۱+V_۲}=\frac{W_s+W_s}{V_۱+۱/۲۵V_۱}=\frac{۸}{۹}\left(\frac{W_s}{V_۱}\right)=\frac{۸}{۹}\gamma_{d_{max}}$$

($\frac{W_s}{V_۱}\to\gamma_{d_{max}}$)

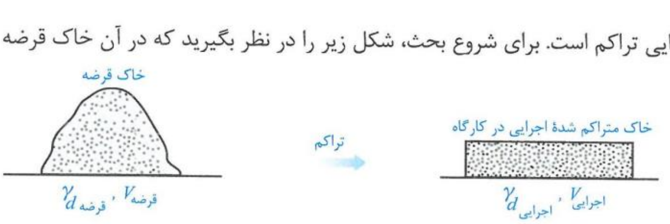
پس در نهایت درصد تراکم خاک متراکم شدهٔ حاصل، برابر است با:

$$RC=\frac{\gamma_d}{\gamma_{d_{max}}}=\frac{\frac{۸}{۹}\gamma_{d_{max}}}{\gamma_{d_{max}}}=\frac{۸}{۹}=۸۹٪$$

بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح این تست است.

B-۲- حل مسائل اجرایی تراکم

یکی از موضوعات مهم در بحث تراکم خاک‌ها، مسائل اجرایی تراکم است. برای شروع بحث، شکل زیر را در نظر بگیرید که در آن خاک قرضه پس از انتقال به کارگاه، کوبیده و متراکم شده است:



با توجه به اینکه وزن خشک خاک (وزن دانه‌های جامد) در هر دو حالت یکسان است، بنابراین مشابه با آنچه در فصل اول خواندید، می‌توان نوشت:

$$W_{s_{\text{قرضه}}} = W_{s_{\text{اجرایی}}} \Rightarrow \gamma_{d_{\text{قرضه}}} \times V_{\text{قرضه}} = \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} \times V_{\text{اجرایی}} \Rightarrow \boxed{\frac{V_{\text{اجرایی}}}{V_{\text{قرضه}}} = \frac{\gamma_{d_{\text{قرضه}}}}{\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}}}$$

اما نکته قابل توجه در مورد رابطهٔ بالا آن است که معمولاً مقادیر $\gamma_{d_{\text{قرضه}}}$ و $\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}$ در صورت سؤال داده نمی‌شوند و ما بایستی با استفاده از اطلاعات موجود، آنها را به‌صورت زیر محاسبه کنیم:

$$\begin{cases} \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \gamma_{d_{max\ \text{آزمایشگاه}}} \times RC \\ \gamma_{d_{\text{قرضه}}} = \dfrac{W_{s_{\text{قرضه}}}}{V_{\text{قرضه}}} = \dfrac{G_s\ \gamma_w}{1+e_{\text{قرضه}}} = \dfrac{\gamma_{\text{قرضه}}}{1+\omega_{\text{قرضه}}} \end{cases}$$

حال در ادامه با حل چند تمرین متنوع شما را با روند حل این مسائل آشنا می‌کنیم.

تمرین ۹: در یک آزمایش تراکم وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک $20\ kN/m^3$ به‌دست آمده است. اگر جهت اجرای یک عملیات خاکی، تراکم ۹۰ درصد موردنیاز باشد، جهت اجرای ۱۰۰۰ مترمکعب عملیات خاکی با این تراکم، چه حجمی از این خاک در محل قرضه‌ای که رطوبت طبیعی آن ۱۲/۵ درصد و وزن مخصوص مرطوب آن $18\ kN/m^3$ می‌باشد، نیاز است؟ (سراسری - ۸۷)

۱) $880\ m^3$ ۲) $1000\ m^3$ ۳) $1125\ m^3$ ۴) $1250\ m^3$

● حل: ابتدا مقادیر $\gamma_{d_{\text{قرضه}}}$ و $\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}$ را براساس مطالب گفته شده، محاسبه می‌کنیم:

$$\gamma_{d_{\text{قرضه}}} = \frac{\gamma_{\text{قرضه}}}{1+\omega_{\text{قرضه}}} = \frac{18}{1+0/125} = 16\ kN/m^3$$

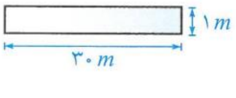
$$\gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \gamma_{d_{max}} \times RC = 20 \times 0/9 = 18\ kN/m^3$$

حال با توجه به اینکه $V_{\text{اجرایی}} = 1000\ m^3$ است، با کمک رابطهٔ گفته شده در بالا، مقدار $V_{\text{قرضه}}$ را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$\frac{V_{\text{اجرایی}}}{V_{\text{قرضه}}} = \frac{\gamma_{d_{\text{قرضه}}}}{\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}} \Rightarrow \frac{1000}{V_{\text{قرضه}}} = \frac{16}{18} \Rightarrow V_{\text{قرضه}} = 1125\ m^3$$

یعنی گزینه (۳) درست است.

تمرین ۱۰: شکل روبرو پروفیل عرضی یک خاکریز متراکم را که جهت احداث یک بزرگراه، اجراشده است، نشان می‌دهد. حجم خاک حمل شده از قرضه برای اجرای یک کیلومتر از این بزرگراه برابر $36000\ m^3$ است. اگر وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک در آزمایش تراکم برابر $2\ gr/cm^3$ باشد، با قرار درصد تراکم ٪۹۰ خاک در محل، نسبت تخلخل خاک قرضه را بدست آورید. $(G_s = 2/7)$



● حل:

$$\begin{cases} \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \gamma_{d_{max}} \times RC = 2 \times 0/9 = 1/8\ gr/cm^3 \\ V_{\text{اجرایی}} = 30 \times 1 \times \boxed{1000} = 30000\ m^3 \quad (\text{برای طول } 1\ km = 1000\ m) \\ V_{\text{قرضه}} = 36000\ m^3 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{\text{اجرایی}}}{V_{\text{قرضه}}} = \frac{\gamma_{d_{\text{قرضه}}}}{\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}} \Rightarrow \frac{30000}{36000} = \frac{\gamma_{d_{\text{قرضه}}}}{1/8} \Rightarrow \gamma_{d_{\text{قرضه}}} = 1/5\ gr/cm^3$$

$$\gamma_{d_{\text{قرضه}}} = \frac{G_s\ \gamma_w}{1+e} \Rightarrow 1/5 = \frac{2/7 \times 1}{1+e} \Rightarrow e = 0/8$$

تمرین ۱۱: به منظور اجرای زیرسازی قطعه‌ای از راه به عرض ۸ متر، طبق مشخصات بایستی مصالح شناسایی شده در قرضه‌ای با رطوبت طبیعی ۱۰ درصد، در ضخامت ۱۲/۵ سانتی‌متر و با تراکم ۹۸ درصد کوبیده شود. اگر نتیجه آزمایش تراکم $(\gamma_d)_{max} = ۲/۰۴۱\ t/m^۳$ باشد و پیمانکار بخواهد با کامیون‌های ۳۳ تنی مصالح را از محل قرضه به محل پروژه بیاورد، فواصل بهینه تخلیه کامیون‌ها در طول راه برحسب متر، چقدر می‌باشد؟

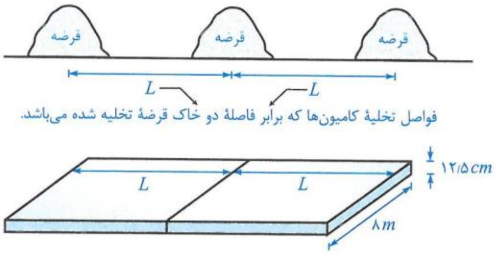
(سراسری - ۸۸)

۱) ۱۵ ۲) ۱۵/۵ ۳) ۱۶ ۴) ۱۶/۵

حل: این مسئله مشابه با تمرین (۹) می‌باشد، با این تفاوت که در اینجا $V_{\text{قرضه}}$ خواسته نشده است بلکه به نوعی محاسبهٔ $V_{\text{اجرایی}}$ مدنظر است.

$$\begin{cases} \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \gamma_{d\,max} \times RC = ۲/۰۴۱ \times ۰/۹۸ = ۲\ t/m^۳ \\ \gamma_{d_{\text{قرضه}}} = \dfrac{\gamma_{\text{قرضه}}}{1+\omega_{\text{قرضه}}} = \dfrac{(\frac{W}{V})_{\text{قرضه}}}{1+\omega} = \dfrac{۳۳}{V_{\text{قرضه}} \times (1+۰/۱)} = \dfrac{۳۰}{V_{\text{قرضه}}} \\ V_{\text{اجرایی}} = ۸ \times ۰/۱۲۵ L = L \end{cases}$$

$$\frac{\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}}{\gamma_{d_{\text{قرضه}}}} = \frac{V_{\text{قرضه}}}{V_{\text{اجرایی}}} \Rightarrow \frac{۲}{(\frac{۳۰}{V_{\text{قرضه}}})} = \frac{V_{\text{قرضه}}}{L} \Rightarrow L = ۱۵\,m$$



بررسی یک نکته مهم

اگر خاک قرضه ترکیبی از دو خاک مختلف A و B باشد، در آن‌صورت باز هم برای حل مسئله باید وزن دانه‌های جامد خاک در قبل و بعد از تراکم را با هم مساوی قرار دهیم:

$$W_{s\,\text{قرضه}} = W_{s\,\text{اجرایی}} \Rightarrow W_{s_{(A\ \text{قرضه})}} + W_{s_{(B\ \text{قرضه})}} = W_{s_{\text{اجرایی}}} \Rightarrow \gamma_{d_{(A\ \text{قرضه})}} V_{(A\ \text{قرضه})} + \gamma_{d_{(B\ \text{قرضه})}} \times V_{(B\ \text{قرضه})} = \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} \times V_{\text{اجرایی}}$$

برای درک بهتر این نکته، به تمرین زیر توجه کنید:

تمرین ۱۲: وزن مخصوص خشک حداکثر خاکی در آزمایش تراکم $۲\ gr/cm^۳$ و رطوبت بهینه آن ۲۰٪ می‌باشد. برای اجرای هر متر مکعب خاکریز از این خاک با ۹۰ درصد تراکم مجاز، چه حجمی از خاک قرضه‌های A و B با مشخصات زیر لازم است تا نسبت اختلاط حجمی خاک‌های A و B به‌ترتیب ۲ و ۳ باشد؟ (خاک قرضه‌ها از یک جنس است و $G_s = ۲/۷$ می‌باشد. در ضمن نسبت تخلخل قرضه‌های A و B به‌ترتیب برابر ۱ و ۰/۸ است.)

۱) $۰/۵۶\ m^۳$ و $۰/۸۴\ m^۳$ ۲) $۰/۴\ m^۳$ و $۰/۶\ m^۳$ ۳) $۰/۵\ m^۳$ و $۰/۷۵\ m^۳$ ۴) $۰/۵\ m^۳$ و $۰/۵\ m^۳$

حل: ابتدا مقادیر وزن مخصوص خشک قرضه‌های A و B و نیز وزن مخصوص خشک اجرایی را می‌یابیم:

$$\gamma_{d_A} = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+e_A} = \frac{۲/۷ \times ۱}{۱+۱} = ۱/۳۵\ gr/cm^۳$$

$$\gamma_{d_B} = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+e_B} = \frac{۲/۷ \times ۱}{۱+۰/۸} = ۱/۵\ gr/cm^۳$$

$$\gamma_d = \gamma_{d_{max}} \times RC = ۲ \times ۰/۹ = ۱/۸\ gr/cm^۳$$

حال با توجه به اینکه $V_{\text{اجرایی}} = ۱\,m^۳$ بوده و نسبت $\dfrac{V_{(A\ \text{قرضه})}}{V_{(B\ \text{قرضه})}} = \dfrac{۲}{۳}$ است، خواهیم داشت:

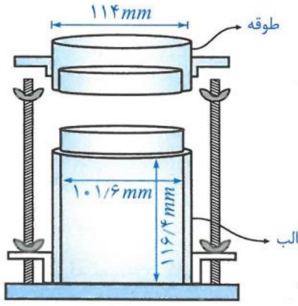
$$\gamma_{d_{(A\ \text{قرضه})}} \times V_{(A\ \text{قرضه})} + \gamma_{d_{(B\ \text{قرضه})}} \times V_{(B\ \text{قرضه})} = \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} \times V_{\text{اجرایی}} \Rightarrow ۱/۳۵ \times V_A + ۱/۵ \times \frac{۳}{۲} V_A = ۱/۸ \times ۱ \Rightarrow V_A = ۰/۵\ m^۳$$

و از آنجا V_B نیز به‌دست می‌آید:

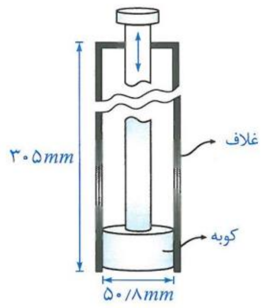
$$V_B = \frac{۳}{۲} V_A = \frac{۳}{۲} \times ۰/۵ = ۰/۷۵\ m^۳$$

C-۱- آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد

نحوهٔ انجام آزمایش به این شکل است که خاک موردنظر هر بار با مقادیر مختلف آب مخلوط شده و در قالبی به قطر (داخلی) ۴ اینچ (حدود ۱۰cm) در سه لایهٔ تقریباً مساوی ریخته می‌شود و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش (که با وزن ۲/۵ kgf از ارتفاع حدود ۳۰cm سقوط کرده و به خاک انرژی اعمال می‌کند) طوری متراکم می‌شود که ارتفاع سه لایه تقریباً مساوی شود. سپس خاک اضافی از روی قالب تراشیده شده و خاک و قالب را وزن می‌کنند.



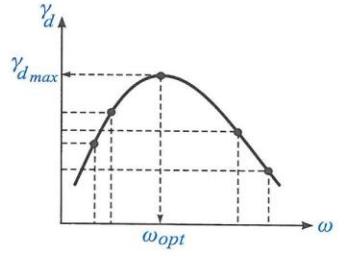
قالب



چکش

پس از تعیین وزن مخصوص مرطوب نمونهٔ خاک، آن را از قالب بیرون آورده و برای مشخص کردن رطوبت خاک، تکه‌ای کوچک از لایهٔ بالایی آن جدا می‌کنند و بقیهٔ خاک را خرد کرده و با مقدار بیشتری آب مخلوط و مجدداً متراکم می‌نمایند.

وقتی رطوبت خاک برای هر آزمایش تعیین شد، با استفاده از رابطهٔ $\gamma_d = \dfrac{\gamma}{1+\omega}$، وزن مخصوص خشک خاک نیز تعیین می‌شود. سپس مقدار γ_d به‌دست آمده را می‌توان در برابر میزان رطوبت مربوطه رسم کرد و از روی آن حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت بهینه نظیر را برای خاک مورد آزمایش به‌دست آورد. همانطورکه قبلاً گفتیم به منحنی به‌دست آمده، منحنی تراکم یا فشردگی گفته می‌شود که در شکل زیر برای یک نمونه خاک نشان داده شده است.



تذکر ۱: انرژی تراکم در آزمایش پروکتور را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$E = \frac{\text{تعداد ضربه‌ها برای هر لایه} \times \text{تعداد لایه‌ها} \times \text{ارتفاع سقوط چکش} \times \text{وزن چکش}}{\text{حجم قالب}}$$

انرژی تراکم معمولاً برحسب کیلوژول برمترمکعب بیان می‌شود.

تذکر ۲: علاوه بر آزمایش تراکم استاندارد می‌توان از **آزمایش تراکم اصلاح شده** نیز استفاده کرد. در این آزمایش وزن چکش ۴/۵ kgf، ارتفاع سقوط چکش ۴۵۷ mm (۴۵/۷ cm) و تعداد لایه‌ها برابر ۵ است و سایر مشخصات آن مثل آزمایش تراکم استاندارد است.

زیر شاخه‌های قسمت سوم

C-۱- آزمایش تراکم (پروکتور) استاندارد
C-۲- روش‌ها و تجهیزات تراکم خاک‌ها
C-۳- تراکم نسبی
C-۴- نکات تکمیلی تراکم

تمرین ۱۳: برروی دو نمونه از یک نوع خاک، آزمایش‌های پروکتور استاندارد و پروکتور اصلاح شده انجام می‌شود. وزن مخصوص خشک ماکزیمم در کدام حالت بیشتر است؟

مشخصات آزمایش‌های پروکتور استاندارد و اصلاح شده به شرح جدول زیر می‌باشد:

مشخصات / نوع آزمایش	پروکتور استاندارد	پروکتور اصلاح شده
وزن چکش (kgf)	۲/۵	۴/۵
ارتفاع سقوط چکش (mm)	۳۰۵	۴۵۷
حجم قالب (cm^3)	۹۴۴	۹۴۴
تعداد لایه‌ها	۳	۵
تعداد ضربات برای هر لایه	۲۵	۲۵

● حل: در آزمایش تراکم اصلاح شده، وزن چکش، ارتفاع سقوط آن و نیز تعداد لایه‌ها بیشتر از آزمایش تراکم استاندارد است (حجم قالب و تعداد ضربات هر لایه نیز در هر دو آزمایش با هم برابر است)، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آزمایش تراکم اصلاح شده انرژی بیشتری دارد و به خاک تراکم بهتری می‌دهد. این به معنی آن است که نمونه‌ای که برروی آن آزمایش پروکتور اصلاح شده انجام می‌شود، وزن مخصوص خشک ماکزیمم بیشتری، نسبت به نمونه دیگر (با آزمایش پروکتور استاندارد) خواهد داشت.

تمرین ۱۴: میزان انرژی تراکم اعمال شده بر $1000 cm^3$ خاک در آزمایش پروکتور اصلاح شده، .... برابر آزمایش پروکتور معمولی است.

۱) ۱/۵ ۲) ۱/۷ ۳) ۴/۵ ۴) ۲/۷ (سراسری - ۹۱)

● حل: با توجه به جدول داده شده در تمرین قبلی می‌توان نوشت:

$$\frac{E_{\text{اصلاح شده}}}{E_{\text{معمولی}}} = \frac{4/5}{2/5} \times \frac{457}{305} \times \frac{5}{3} \simeq 4/5$$

(نسبت وزن چکش‌ها × نسبت ارتفاع سقوط چکش‌ها × نسبت تعداد لایه‌ها)

بنابراین گزینه (۳) پاسخ صحیح این تست است.

C-۲- روش‌ها و تجهیزات تراکم خاک‌ها

برای متراکم کردن خاک در کارگاه‌های ساختمانی و پروژه‌های عمرانی با توجه به نوع پروژه، نوع خاک و مسائل اقتصادی پروژه، می‌توان از روش‌های زیر کمک گرفت:

● **استفاده از ماشین‌آلات تراکم و غلتک‌ها**

متداول‌ترین غلتک‌هایی که برای تراکم خاک‌ها از آنها استفاده می‌شود، به‌شرح زیر می‌باشند:

الف) غلتک پاچه‌بزی: این غلتک برای خاک‌های ریزدانهٔ خمیری و غیرخمیری و درشت‌دانه‌هایی که بیش از ۲۰ درصد ریزدانه دارند، کاربرد داشته و عمق تأثیر آن تا $30 cm$ می‌رسد. مکانیزم کار غلتک پاچه‌بزی به‌صورت استاتیکی و ضربه‌ای است.

ب) غلتک‌های لغزنده: این غلتک‌ها در اندازه‌های مختلف موجود بوده و دارای تواتر و دامنهٔ قابل تنظیم می‌باشند. مکانیزم و عملکرد غلتک‌های لغزنده به‌صورت ارتعاشی و استاتیکی می‌باشد و این غلتک‌ها برای خاک‌های درشت‌دانه ایده‌آل می‌باشند (به‌خصوص خاک‌های درشت‌دانهٔ یکنواخت).

ج) غلتک چرخ فولادی: این غلتک به‌طور وسیعی در کارهای مربوط به تراکم آسفالت کاربرد داشته و برای خاک‌های درشت‌دانهٔ خوب دانه‌بندی شده و یا ریزدانه‌های غیر خمیری نیز مفید است. مکانیزم غلتک چرخ فولادی به‌صورت استاتیکی است.

● **به‌کارگیری روش تراکم ارتعاشی غوطه‌ور**

از این روش برای متراکم کردن لایه‌های ضخیم خاک‌های دانه‌ای سست استفاده می‌شود و در آن با کمک یک دستگاه، در اعماق مختلف خاک لغزش ایجاد می‌شود.

- **به‌کارگیری روش تراکم دینامیکی**

این روش برای ایجاد تراکم در لایه‌های ضخیم خاک و نیز خاک‌های دانه‌ای سست کاربرد دارد و در آن وزنه‌های سنگینی با وزن ۳۰ تا ۲۰۰ تن توسط جرثقیل‌های بزرگ بالا برده شده و سپس بر روی خاک رها می‌شوند تا با سقوط خود، انرژی را به خاک منتقل کرده و آن را متراکم کنند.

- **استفاده از انفجار**

این روش برای متراکم کردن لایه‌های ضخیم خاک‌های دانه‌ای و لجن‌ها کاربرد دارد و با کمک آن می‌توان تا تراکم ٪۸۰ را ایجاد کرد.

- **روش پیش بارگذاری خاک‌ها**

این روش مخصوص خاک‌های رسی اشباع است و در آن قبل از بارگذاری اصلی، با خاکریزی روی سطح خاک، باری بزرگتر از بار سازه به خاک وارد می‌کنند تا خاک نشست کرده و متراکم شود.

- **روش پایین آوردن سطح آب زیرزمینی**

در این روش نیز پایین آمدن سطح سفرهٔ آب زیرزمینی، عامل نشست و متراکم شدن خاک است که در مورد آن در فصل‌های بعدی به‌طور مفصل بحث خواهیم کرد.

تمرین ۱۵: برای متراکم ساختن مؤثر یک لایه خاک ماسه‌ای خشک با تخلخل اولیه زیاد (بسیار سست) مناسب‌ترین روش تراکم کدام است؟
(سراسری – ۸۸)

۱) انجام پیش‌بارگذاری
۲) اشباع کردن لایهٔ موردنظر
۳) استفاده از غلتک‌های معمولی
۴) استفاده از روش‌های ارتعاشی (دینامیکی)

- **پاسخ** با توجه به توضیحات داده شده در متن درس، گزینهٔ (۴) درست است.

C-۳- تراکم نسبی

برای مقایسه وضعیت تراکمی یک خاک با متراکم‌ترین و سست‌ترین حالت آن از معیاری به نام **تراکم نسبی** یا **دانسیته نسبی** استفاده می‌شود که آن را با D_r نشان می‌دهیم. اگر در متراکم‌ترین حالت که $e = e_{min}$ است، $D_r = ۱$ بوده و در شل‌ترین حالت که $e = e_{max}$ است، $D_r = ۰$ باشد، در آن‌صورت در وضعیت طبیعی که نسبت تخلخل برابر e است، D_r برابر خواهد بود با:

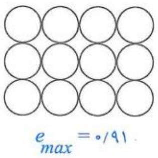
e_{max}	e	e_{min}
$D_r = ۰$	D_r	$D_r = ۱$

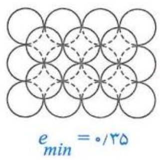
$$\xrightarrow{\text{درون‌یابی خطی}} \frac{e_{max} - e_{min}}{۰ - ۱} = \frac{e_{max} - e}{۰ - D_r} \Rightarrow D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

در مورد تراکم نسبی (D_r) به نکات زیر توجه کنید:

۱) تراکم نسبی پارامتری است که معمولاً برای درشت‌دانه‌ها به‌کار می‌رود و هر چقدر که بیشتر باشد، نشان‌دهندهٔ مقاومت بیشتر خاک است.

۲) در یک تودهٔ خاک چنانچه ذرات آن کروی و هم‌اندازه فرض شوند، در آن‌صورت مقادیر حداکثر و حداقل برای نشانه خلاء (e)، به‌صورت زیر خواهند بود:


پلان
$e_{max} = ۰/۹۱$


پلان
$e_{min} = ۰/۳۵$

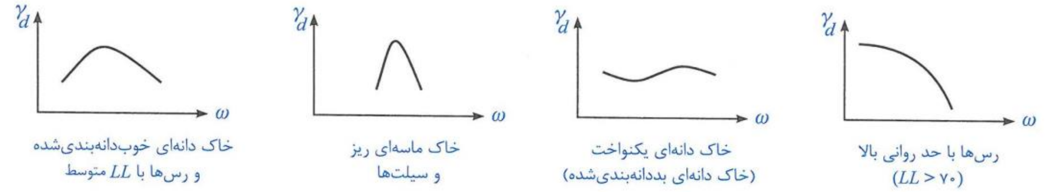
۳) تراکم نسبی را می‌توان برحسب وزن مخصوص خشک خاک، به‌صورت زیر نیز محاسبه کرد:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{۱+e} \Rightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - ۱ \Rightarrow D_r = \frac{\frac{۱}{\gamma_{d_{min}}} - \frac{۱}{\gamma_d}}{\frac{۱}{\gamma_{d_{min}}} - \frac{۱}{\gamma_{d_{max}}}}$$

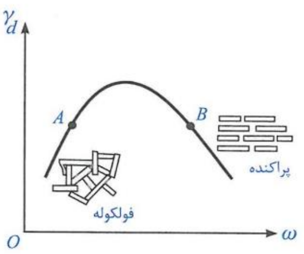
C-۴- نکات تکمیلی تراکم

در این بخش با ذکر چند نکتهٔ تکمیلی، فصل تراکم خاک‌ها را به پایان می‌رسانیم:

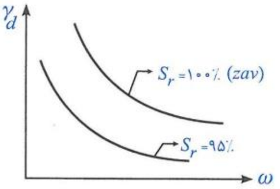
نکته ۱: منحنی تراکم برای انواع خاک‌ها به‌صورت زیر است:



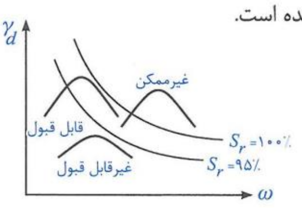
نکته ۲: ساختمان خاک رس در دو قسمت چپ و راست منحنی تراکم، به‌صورت زیر است:



نکته ۳: اگر در مختصات $(\gamma_d - \omega)$ منحنی اشباع ٪۱۰۰ (zav) و منحنی اشباع ٪۹۵ را ترسیم کنیم، در آن‌صورت شکل این منحنی‌ها به‌صورت زیر خواهد بود:



آیین‌نامه‌ها تصریح می‌کنند که بایستی درصد اشباع خاک در رطوبت بهینه کنترل شود، به‌این صورت که قلهٔ منحنی تراکم بین منحنی اشباع ٪۱۰۰ و ٪۹۵ قرار گیرد. این موضوع که به آن **کنترل تراکم** می‌گوییم، در شکل زیر نشان داده شده است.



تمرین ۱۶: با انجام آزمایش تراکم برروی یک خاک، وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه آن به‌ترتیب $۱۶/۶۷\ kN/m^3$ و ٪۱۵ به‌دست آمده‌اند. اگر چگالی دانه‌های جامد $G_s = ۲/۵$ و وزن مخصوص آب $\gamma_w = ۱۰\ kN/m^3$ باشد، آیا منحنی تراکم به‌دست آمده قابل قبول بوده است؟

● حل:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{G_s \gamma_w}{1+(\frac{\omega G_s}{S_r})} \Rightarrow ۱۶/۶۷ = \frac{۲/۵ \times ۱۰}{۱+(\frac{۰/۱۵ \times ۲/۵}{S_r})} \Rightarrow S_r = ۰/۷۵ < ۰/۹۵ \Rightarrow$$ قابل قبول نیست

تمرین ۱۷: در یک کارگاه راهسازی پس از متراکم کردن خاک، گودالی حفر می‌شود و مقداری خاک جهت کنترل تراکم خارج می‌گردد. وزن مخلوط خارج شده از گودال $1800\ gr$ است که پس از خشک شدن در کوره به $1600\ gr$ کاهش می‌یابد. اگر گودال مذکور با $1750\ gr$ ماسه به وزن مخصوص $1/75\ gr/cm^3$ پر شود، در آن‌صورت وزن مخصوص خشک و رطوبت خاک متراکم در کارگاه را به‌دست آورید و آنها را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه کنید. ($\gamma_{d_{max}}=1/6\ gr/cm^3$، $\omega_{opt}=16\%$ و درصد تراکم مجاز ٪۱۰۰ است.)

حل: ابتدا حجم گودالی که خاک متراکم را از آن خارج کرده‌ایم، محاسبه می‌کنیم:

$$\gamma_{\text{ماسه}}=\frac{W_{\text{ماسه}}}{V_{\text{ماسه}}} \Rightarrow 1/75=\frac{1750}{V_{\text{ماسه}}} \Rightarrow V_{\text{ماسه}}=V_{\text{گودال}}=1000\ cm^3$$

حالا وزن مخصوص خشک خاک متراکم را به‌دست می‌آوریم:

$$\gamma_d=\frac{W_s}{V}=\frac{1600}{1000}=1/6\ gr/cm^3$$

وزن مخصوص خشک اجرایی در کارگاه باید برابر مقدار زیر باشد:

$$\gamma_d = \gamma_{d_{max}} \times RC = 1/6 \times 1 = 1/6\ gr/cm^3 \quad \text{اجرایی کارگاه}$$

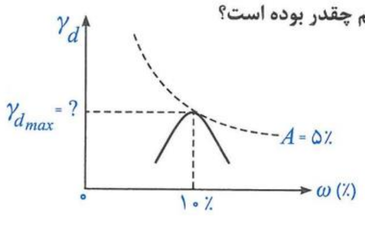
و این یعنی خاک موردنظر به اندازهٔ تراکم مجاز کوبیده شده است.

درمورد رطوبت خاک در کارگاه نیز داریم:

$$\gamma=\gamma_d\,(1+\omega) \Rightarrow \frac{1800}{1000}=\frac{1600}{1000}(1+\omega) \Rightarrow \omega=0/125=12/5\%$$

یعنی خاک موردنظر به اندازهٔ ٪۳/۵ = ۱۲/۵ − ۱۶، کمبود رطوبت دارد.

تمرین ۱۸: با انجام آزمایش تراکم برروی یک نمونه خاک، مشخص شد که منحنی تراکم آن مطابق شکل زیر است. اگر چگالی دانه‌های جامد و وزن مخصوص آب به ترتیب ۲/۵ و $10\ kN/m^3$ باشند، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک در آزمایش تراکم چقدر بوده است؟



حل:

$$\gamma_d=\frac{G_s\,(1-A)\,\gamma_w}{1+\omega\, G_s}=\frac{2/5\times(1-0/05)\times 10}{1+0/1\times 2/5}=19\ kN/m^3$$

تمرین ۱۹: نتایج به‌دست آمده از آزمایش دانه‌بندی برروی دو نمونه خاک، به شرح جدول زیر است. درمورد وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینهٔ آنها، در آزمایش تراکم با انرژی یکسان، چگونه می‌توان اظهارنظر کرد؟

درصد وزنی عبوری خاک B	درصد وزنی عبوری خاک A	اندازه الک (mm)
۴	۲	۰/۰۷۵
۱۰	۱۰	۰/۲
۳۰	۲۰	۰/۵
۶۰	۳۰	۱
۸۰	۶۰	۲
۱۰۰	۷۰	۴/۷۵

● **حل:** با مشخص کردن نام دو خاک A و B و مقایسه آنها باهم خواهیم داشت:

خاک A: ابتدا حرف اول خاک را تعیین می‌کنیم:

$F_{200} = 2\% < 50\% \Rightarrow$ خاک درشت‌دانه است و حرف اول آن G یا S می‌باشد

$$\begin{cases} \text{درصد ماسه} = F_4 - F_{200} = 70 - 2 = 68\% \\ \text{درصد شن} = 100 - F_4 = 100 - 70 = 30\% \end{cases} \Rightarrow \text{درصد شن} < \text{درصد ماسه} \Rightarrow$$ حرف اول (S) است.

در ادامه برای تعیین حرف دوم خاک داریم:

$$F_{200} = 2\% < 5\% \xrightarrow{\text{کیفیت دانه‌بندی مهم است}} \begin{cases} C_u = \dfrac{D_{60}}{D_{10}} = \dfrac{2}{0/2} = 10 > 6 \\ C_c = \dfrac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \dfrac{1^2}{2 \times 0/2} = 2/5 \Rightarrow 1 < C_c < 3 \end{cases}$$

$\Rightarrow$ خاک خوب دانه‌بندی شده است و حرف دوم (W) است.

بنابراین خاک A با نام $\boxed{SW}$، یک خاک ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده است که ۳۰ درصد آن را هم شن تشکیل داده است.

خاک B: برای تعیین حرف اول خاک داریم:

$F_{200} = 4\% < 50\% \Rightarrow$ خاک درشت‌دانه است و حرف اول آن G یا S می‌باشد.

از طرفی چون هیچ خاکی روی الک ۴ نمانده است (درصد دانه‌های ریزتر از $4/75\ mm$، ۱۰۰٪ است)، بنابراین شن نداریم و این خاک قطعاً ماسه‌ای (S) است.

حال برای تعیین حرف دوم خاک می‌نویسیم:

$$F_{200} = 4\% < 5\% \xrightarrow[\text{مهم است}]{\text{کیفیت دانه‌بندی}} C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1}{0/2} = 5 < 6 \Rightarrow$$ خاک بد دانه‌بندی شده است و حرف دوم آن (P) می‌باشد.

بنابراین خاک B با نام $\boxed{SP}$، یک خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده است که شن هم ندارد. از مقایسه دو خاک A و B معلوم است که خاک A اولاً درشت‌دانهٔ بیشتری دارد، ثانیاً خوب دانه‌بندی شده است. پس می‌توان گفت تراکم بهتری نسبت به خاک B دارد. نتیجه آنکه با انرژی یکسان، خاک A با رطوبت بهینهٔ کمتری (نسبت به خاک B) می‌تواند وزن مخصوص خشک ماکزیمم بیشتری (نسبت به خاک B) داشته باشد.

تمرین ۲۰: نتایج آزمایش تراکم برای یک خاک به شرح جدول زیر است:

	نمونه (۱)	نمونه (۲)	نمونه (۳)	نمونه (۴)	نمونه (۵)
$\omega\ (\%)$	۷	۱۰	۱۲	۱۵	۱۸
$\gamma_d\ (kN/m^3)$	۱۷	۱۸	۲۰	۱۹	۱۷/۵

می‌خواهیم یک خاکریز متراکم از این خاک با ۹۰ درصد تراکم استاندارد بسازیم و برای این منظور از قرضه‌های A و B از همین خاک با مشخصات مقابل استفاده می‌کنیم:

A قرضهٔ: $\gamma = 18\ kN/m^3$, $\omega = 20\%$ $\qquad$ B قرضهٔ: $\gamma = 16/8\ kN/m^3$, $\omega = 5\%$

برای اجرای یک متر مکعب از این خاکریز چه حجمی از خاک‌های قرضهٔ A و B لازم است، بدون آنکه آبی به مخلوط اضافه یا از آن کم شود؟

● **حل:** ابتدا $\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}$ و رطوبت نظیر آن را به‌دست می‌آوریم:

$$\gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \boxed{\gamma_{d_{max}}} \times RC = 20 \times 0/9 = 18\ kN/m^3 \xrightarrow{\text{جدول}} \omega = 10\% = 0/1$$

$\gamma_{d_{max}} \rightarrow 20\ kN/m^3$

حال برای یک متر مکعب از این خاکریز می‌توان گفت:

$$\gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \frac{W_{s_{\text{اجرایی}}}}{V_{\text{اجرایی}}} \Rightarrow 18 = \frac{W_{s_{\text{اجرایی}}}}{1} \Rightarrow W_{s_{\text{اجرایی}}} = 18\ kN$$

$$\omega = \frac{W_{w_{\text{اجرایی}}}}{W_{s_{\text{اجرایی}}}} \Rightarrow 0/1 = \frac{W_{w_{\text{اجرایی}}}}{18} \Rightarrow W_{w_{\text{اجرایی}}} = 1/8\ kN$$

در ادامه با توجه اینکه آبی به مجموعه اضافه یا کم نشده است (صورت سؤال) می‌توان نوشت:

$$W_{w_{\text{اجرایی}}} = W_{w_A} + W_{w_B} = \omega_A W_{s_A} + \omega_B W_{s_B} \Rightarrow \boxed{۱/۸ = ۰/۲ W_{s_A} + ۰/۰۵ W_{s_B}} \quad \text{رابطهٔ } (I)$$

از طرفی می‌دانیم:

$$W_{s_{\text{اجرایی}}} = W_{s_A} + W_{s_B} \Rightarrow \boxed{۱۸ = W_{s_A} + W_{s_B}} \quad \text{رابطهٔ } (II)$$

حال از این دو رابطه، یک دستگاه دو معادله دو مجهولی حاصل می‌شود که می‌توان با حل آن، به‌راحتی W_{s_A} و W_{s_B} را به‌دست آورد:

$$\begin{cases} ۰/۲ W_{s_A} + ۰/۰۵ W_{s_B} = ۱/۸ \\ W_{s_A} + W_{s_B} = ۱۸ \end{cases} \Rightarrow W_{s_A} = ۶\,kN \quad , \quad W_{s_B} = ۱۲\,kN$$

و در نهایت حجم به‌کار رفته از خاک‌های قرضه A و B در اجرای یک متر مکعب از این خاکریز را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$V_A = \frac{W_{s_A}}{\gamma_{d_A}} \quad , \quad \gamma_d = \frac{\gamma_A}{۱+\omega_A} = \frac{۱۸}{۱+۰/۲} = ۱۵\,kN/m^۳ \Rightarrow V_A = \frac{۶}{۱۵} = ۰/۴\,m^۳$$

$$V_B = \frac{W_{s_B}}{\gamma_{d_B}} \quad , \quad \gamma_{d_B} = \frac{\gamma_B}{۱+\omega_B} = \frac{۱۶/۸}{۱+۰/۰۵} = ۱۶\,kN/m^۳ \Rightarrow V_B = \frac{۱۲}{۱۶} = ۰/۷۵\,m^۳$$

تست‌های فصل سوم

۱- در قسمت اول منحنی تراکم با افزایش رطوبت، دانسیته افزایش می‌یابد، چون: (سراسری - ۷۴)

۱) دانه‌بندی تغییر می‌کند.
۲) رطوبت در منفذهای ذرات جامد خاک خشک نفوذ می‌کند.
۳) رطوبت سطح خارجی ذرات خاک را اندود کرده و بهتر در هم فرو می‌روند.
۴) انرژی تراکم افزایش می‌یابد.

۲- در یک خاک حجم هوا، ۲۰ درصد حجم کل خاک را تشکیل می‌دهد. اگر حجم هوا در این خاک با عمل تراکم نصف شود، وزن مخصوص خشک خاک چند برابر می‌شود؟

۱) $\frac{۹}{۸}$ ۲) $\frac{۱۰}{۹}$ ۳) $\frac{۸}{۷}$ ۴) $\frac{۶}{۵}$

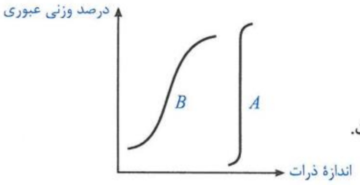
۳- یک نمونه خاک که مطابق آزمایش پروکتور با درصد رطوبت بهینه ۰/۲ متراکم شده است، دارای وزن مخصوص ۲۰ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد. اگر این نمونه خاک را با افزایش آب به حالت اشباع برسانیم وزن مخصوص اشباع آن چقدر خواهد بود؟
$(G_s = ۲/۷۵ \ , \ \gamma_w = ۱۰ \ kN/m^۳)$ (سراسری - ۷۸)

۱) $۲۰ \ kN/m^۳$ ۲) $۲۱ \ kN/m^۳$ ۳) $۲۱/۶ \ kN/m^۳$ ۴) $۲۰/۶ \ kN/m^۳$

۴- اگر در آزمایش تراکم استاندارد به‌جای استفاده از چکش ۲/۵ کیلوگرمی از چکش ۵ کیلوگرمی استفاده می‌شد، در آن‌صورت وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه به‌ترتیب چه تغییری می‌کردند؟

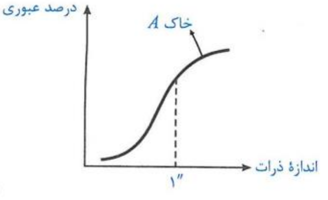
۱) وزن مخصوص خشک حداکثر، بیشتر و رطوبت بهینه کمتر می‌شد.
۲) وزن مخصوص خشک حداکثر، کمتر و رطوبت بهینه بیشتر می‌شد.
۳) هردو بیشتر می‌شدند.
۴) هردو کمتر می‌شدند.

۵- منحنی دانه‌بندی ۲ نوع خاک A و B مطابق شکل است. در این حالت می‌توان گفت: (سراسری - ۸۴)



۱) دانه‌بندی خاک B از A بهتر و خاصیت تراکم‌پذیری خاک B از خاک A بهتر است.
۲) دانه‌بندی خاک B از A بهتر ولی خاصیت تراکم‌پذیری خاک A از B بهتر است.
۳) دانه‌بندی خاک B از A بهتر ولی درمورد خاصیت تراکم‌پذیری آن دو نمی‌توان قضاوت کرد.
۴) دانه‌بندی خاک A از B در همه کاربردها بهتر بوده ولی خاصیت تراکم‌پذیری B از A بهتر است.

۶- خاک A با منحنی دانه‌بندی داده شده، موردنظر است. عبوری خاک از الک "۱ (یک اینچ) را خاک B می‌نامیم. درخصوص این دو خاک می‌توان گفت: (سراسری - ۸۷)

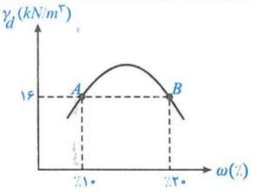


۱) درصد رطوبت بهینه و $(\gamma_d)_{max}$ خاک B از خاک A کمتر است ولی ضریب نفوذپذیری آن بیشتر می‌شود.
۲) درصد رطوبت بهینه و ضریب نفوذپذیری خاک B از خاک A بیشتر ولی $(\gamma_d)_{max}$ آن کمتر از خاک A است.
۳) درصد رطوبت بهینه، $(\gamma_d)_{max}$ و ضریب نفوذپذیری خاک B از خاک A بیشتر است.
۴) درصد رطوبت بهینه خاک B از خاک A بیشتر و $(\gamma_d)_{max}$ و ضریب نفوذپذیری آن کمتر از خاک A است.

۷- با افزایش انرژی تراکم، منحنی تراکم (تغییرات وزن مخصوص خشک γ_d در برابر رطوبت ω) به‌سمت .... حرکت می‌کند و .... می‌شود و رطوبت بهینه آن .... می‌یابد. (سراسری - ۹۳)

۱) بالا - جمع‌تر - کاهش ۲) بالا - جمع‌تر - افزایش ۳) بالا - بازتر - افزایش ۴) پایین - بازتر - کاهش

۸- پس از انجام آزمایش تراکم برروی یک خاک، منحنی مقابل به‌دست آمده است. اگر نسبت تخلخل خـاک در نقطهٔ A برابر ۰/۸ باشد، نسبت تخلخل خاک در نقطهٔ B کدام است؟



۱) ۰/۸
۲) ۰/۷۵
۳) ۰/۶۵
۴) ۰/۵

۹- کدام عبارت درمورد یک نوع خاک خاص، صحیح است؟ (سراسری - ۸۰)

۱) روش انجام آزمایش در تعیین درصد تراکم تأثیری ندارد.
۲) درصد تراکم خاک می‌تواند بیش از صد در صد باشد.
۳) رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر مقدار ثابتی است.
۴) با افزایش انرژی تراکم، وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

۱۰- وزن مخصوص خشک حداکثر خاکی در آزمایش تراکم $20\ kN/m^3$ و رطوبت بهینه آن ٪۱۰ به‌دست آمده است. جهت احداث خاکریزی با ٪۹۰ تراکم مجاز و رطوبت ٪۸، از خاک قرضه‌ای با رطوبت طبیعی ۵ درصد و وزن مخصوص $17/5\ kN/m^3$ استفاده می‌شود. چند لیتر آب اضـافی جهت استفاده در خاکریز، برای یک مترمکعب خاک قرضه موردنیاز است؟ ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$)

۱) ۱۳۰
۲) ۱۰۰
۳) ۸۰
۴) ۵۰

۱۱- جرم مخصوص خشک حداکثر خاکی در آزمایشگاه طبق روش تراکم استاندارد $2\ gr/cm^3$ تعیین شده است. برای خاکریزی به عرض ۵ متر و ضخامت ۰/۲ متر، فواصل تخلیه کامیون‌های ۱۹/۸ تنی را با فرض رطوبت خاک قرضه برابر با ٪۱۰ به‌دست آورید. قرار اسـت درصـد تـراکم خاک در محل ٪۹۰ باشد. (سراسری - ۸۶)

۱) ۹ متر
۲) ۹/۵ متر
۳) ۱۰ متر
۴) ۱۱ متر

۱۲- ۱۷۶ گرم از خاکی با حجم ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب و رطوبت ۱۰ درصد با ۱۸۰ گرم از یک خاک دیگر به حجم ۹۰ سانتی‌متر مکعـب و رطوبـت ۲۵ درصد مخلوط شده و بدون تغییر در میزان رطوبت، حجم نمونهٔ حاصل به ۱۶۰ سانتی‌متر مکعب می‌رسد. اگر درصد تراکم نمونهٔ موردنظر ٪۹۵ باشد، در آن‌صورت وزن مخصوص خشک حداکثر در آزمایش تراکم برروی این خاک چقدر بوده است؟ (بر حسب gr/cm^3)

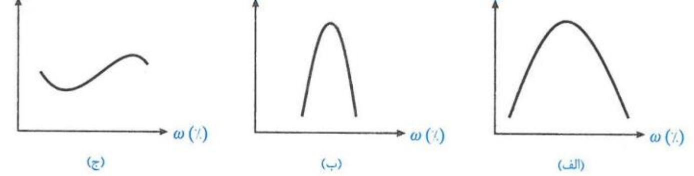
۱) ۱/۸
۲) ۱/۹
۳) ۲
۴) ۲/۱

۱۳- وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاکی در آزمایش تراکم ۱/۸ تن بر مترمکعب است. برای اجرای ۵ مترمکعب عملیات خاکریزی با ۹۰ درصـد تراکم مجاز، چه حجمی از این خاک در قرضه‌ای که رطوبت طبیعی آن ۱۰ درصد و وزن مخـصوص آن ۱/۶۵ تـن بـر مترمکعـب اسـت، لازم می‌باشد؟ (برحسب مترمکعب) (سراسری - ۷۶)

۱) ۵/۴۰
۲) ۵/۷۰
۳) ۴/۵۰
۴) ۷/۵۰

مباحث تکمیلی تراکم خاک

۱۴- منحنی‌های تراکم زیر معمولاً در کدام نوع از خاکها مشاهده می‌شود؟ (سراسری - ۷۹)



۱) (الف) ماسه‌های یکنواخت دانه‌بندی شده، (ب) سیلت‌ها، (ج) رس‌ها
۲) (الف) ماسه‌های یکنواخت دانه‌بندی شده، (ب) رس‌ها و ماسه‌های خوب دانه‌بندی شده، (ج) سیلت‌ها
۳) (الف) رس‌ها و ماسه‌های خوب‌دانه‌بندی‌شده، (ب) سیلت‌ها، (ج) ماسه‌های یکنواخت دانه‌بندی شده
۴) (الف) سیلت‌ها، (ب) ماسه‌های یکنواخت دانه‌بندی شده، (ج) ماسه‌های خوب‌دانه‌بندی شده

۱۵- اگر نسبت تخلخل یک نمونه خاک در سست‌ترین حالت برابر ۱/۱ و در متراکم‌ترین حالت نیز برابر ۰/۳۵ باشد، در این صورت وزن مخـصوص خشک این نمونه در دانسیته نسبی ٪۸۰ $D_r =$ کدام است؟ ($G_s = 2/5$ ، $\gamma_w = 10\ kN/m^3$)

۱) ۱۵
۲) ۱۶/۷
۳) ۱۷/۵
۴) ۱۸/۸

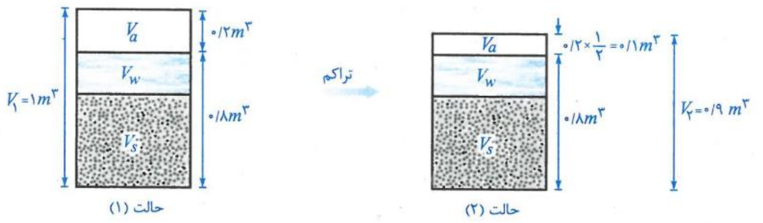
پاسخ تست‌های فصل سوم

۱- (۳)

همانطور که در پاسخ سؤال ۲ از صفحهٔ ۱۰۴ گفته شد، در قسمت اول منحنی تراکم، افزایش رطوبت باعث روغن‌کاری بهتر سطح دانه‌های خاک می‌شود و در نتیجه دانه‌ها بهتر در هم فرو رفته و تراکم بهتری خواهیم داشت.

۲- (۲)

فرض کنید حجم خاک $V = 1\,m^3$ باشد، در آن‌صورت دیاگرام سه فازی خاک در این دو حالت به‌صورت زیر خواهد بود:



از طرفی می‌دانیم W_s در هر دو حالت یکسان است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$W_{s_1} = W_{s_2} \Rightarrow \gamma_{d_1} V_1 = \gamma_{d_2} V_2 \Rightarrow \frac{\gamma_{d_2}}{\gamma_{d_1}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{0/9} = \frac{10}{9}$$

۳- (۴)

ابتدا با توجه به اطلاعات صورت سؤال، مقدار نسبت تخلخل خاک (e) در وضعیت موجود را می‌یابیم:

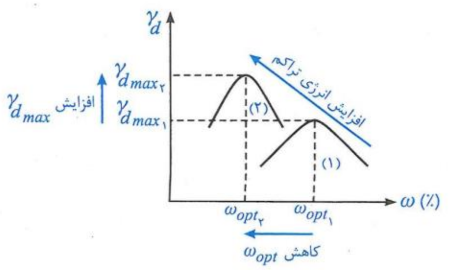
$$\gamma_t = \frac{G_s\,(1+\omega)\gamma_w}{1+e} \Rightarrow 20 = \frac{2/75(1+0/2)\times 10}{1+e} \Rightarrow e = 0/65$$

چون پس از آزمایش تراکم و با افزایش آب، خاک را اشباع کرده‌ایم، بنابراین حجم خاک در این فرآیند تغییر نخواهد کرد و همین e که در بالا به‌دست آوردیم، در محاسبهٔ γ_{sat} استفاده می‌شود:

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1+e} = \frac{(2/75 + 0/65)\times 10}{1+0/65} = 20/6\,kN/m^3$$

۴- (۱)

با سنگین‌تر شدن چکش در آزمایش تراکم، انرژی تراکم افزایش می‌یابد. در این شرایط منحنی تراکم به سمت چپ و بالا حرکت می‌کند، یعنی درصد رطوبت بهینه (ω_{opt}) کاهش یافته و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک $(\gamma_{d_{max}})$ افزایش خواهد یافت.



۵- (۱)

اگر فرض کنیم محور افقی نمودار، اندازه همهٔ ذرات خاک را از ریزدانه تا درشت‌دانه نشان می‌دهد، در آن‌صورت می‌توان گفت دانه‌بندی خاک B از خاک A بهتر است، زیرا خاک B از تمام اندازه‌های خاک، تقریباً به میزان مساوی در اختیار دارد درحالی که خاک A دارای دانه‌بندی یکنواخت بوده و فاقد ریزدانه است. از این‌رو باتوجه به پاسخ سؤال (۲) در صفحهٔ ۱۰۷ می‌توان گفت، ازلحاظ تراکم‌پذیری نیز خاک B شرایط بهتری نسبت به خاک A دارد زیرا کیفیت دانه‌بندی آن بهتر است.

(۴) -۶

خاک B به نوعی بخش ریزدانه‌تر خاک A می‌باشد، پس خاک A (که درشت‌دانه‌تر است) بهتر از خاک B متراکم شده و $\gamma_{d_{max}}$ آن از خاک B بیشتر و رطوبت بهینه‌اش نسبت به B کمتر است.

همچنین هر چه خاک درشت‌دانه‌تر باشد، فضای عبور آب از درون آن بیشتر بوده و نفوذپذیری بالاتری دارد، بنابراین نفوذپذیری خاک A از B بیشتر است.

پس در یک جمع‌بندی و برای پاسخ به این تست می‌توان گفت:

$$\gamma_{d_{max_A}} > \gamma_{d_{max_B}} \quad , \quad \omega_{opt_A} < \omega_{opt_B} \quad , \quad \text{نفوذپذیری } B < \text{نفوذپذیری } A$$

(۱) -۷

با توجه به توضیحات متن درس با افزایش انرژی تراکم، به تراکم بهتری می‌رسیم که در این حالت منحنی تراکم به‌سمت بالا و چپ حرکت کرده و جمع‌تر می‌شود. در این شرایط وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافته و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. با توجه به این توضیحات، گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح این تست است.

(۱) -۸

رابطهٔ وزن مخصوص خشک خاک را در نظر بگیرید.

$$\gamma_d = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+e}$$

با توجه به منحنی تراکم داده شده، چون γ_d نظیر نقاط A و B یکسان است، بنابراین می‌توان گفت:

$$\gamma_{d_A} = \gamma_{d_B} = 16\ kN/m^3 \xrightarrow{\gamma_w \text{ و } G_s \text{ ثابت}} e_A = e_B = 0/8$$

(۲) -۹

طبق آنچه در متن درس گفته شد، ممکن است درصد تراکم خاک (RC) از صد درصد هم بیشتر شود، پس گزینهٔ (۲) صحیح است.

اما علت نادرست بودن سایر گزینه‌ها به شرح زیر می‌باشد.

گزینهٔ (۱): با تغییر در جزئیات آزمایش تراکم، انرژی تراکم تغییر کرده و $\gamma_{d_{max}}$ متفاوت خواهد شد. پس RC نیز تغییر می‌کند و این یعنی روش انجام آزمایش بر روی RC تأثیرگذار است.

گزینهٔ (۳): با تغییر در انرژی تراکم و نوع خاک، ω_{opt} و $\gamma_{d_{max}}$ نیز تغییر می‌کنند و ثابت نیستند.

گزینهٔ (۴): با افزایش انرژی تراکم، اگرچه $\gamma_{d_{max}}$ افزایش می‌یابد ولی ω_{opt} کم می‌شود.

(۴) -۱۰

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \Rightarrow \Delta\omega = \frac{\Delta W_w}{W_s} \Rightarrow \Delta W_w = (\underbrace{\omega_2}_{\text{رطوبت خاکریز}} - \underbrace{\omega_1}_{\text{رطوبت قرضه}}) \times W_s$$

در رابطهٔ بالا W_s وزن دانه‌های جامد است که برای یک متر مکعب از خاک قرضه و V_2 متر مکعب از خاکریز یکسان می‌باشد. در اینجا چون حجم خاک قرضه را داریم ($V = 1m^3$)، بهتر است W_s را براساس مشخصات خاک قرضه، به‌صورت زیر به‌دست آوریم:

$$\gamma_{d\,\text{قرضه}} = \frac{\gamma_{\text{قرضه}}}{1+\omega_{\text{قرضه}}} = \frac{17/5}{1+0/05} = 16/67\ kN/m^3$$

$$\gamma_{d\,\text{قرضه}} = \frac{W_s}{V_{\text{قرضه}}} \Rightarrow 16/67 = \frac{W_s}{1} \Rightarrow W_s = 16/67\ kN$$

حال در ادامه با جایگذاری در رابطهٔ اولیه، خواهیم داشت:

$$\Delta W_w = (0/08 - 0/05) \times 16/67 = 0/5\ kN$$

$$\Delta V_w = \frac{\Delta W_w}{\gamma_w} = \frac{0/5}{10} = 0/05\ m^3 = 50\ lit$$

۱۱- (۳)

این تست دقیقاً مشابه تمرین (۱۱) از متن درس است، با این تفاوت که به‌جای وزن مخصوص از جرم مخصوص استفاده شده است. پس به طریق مشابه می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \rho_{d_{\text{اجرایی}}} = \rho_{d_{max}} \times RC = ۲ \times ۰/۹ = ۱/۸\ gr/cm^۳ = ۱/۸\ ton/m^۳ \\ \rho_{d_{\text{قرضه}}} = \dfrac{\rho_{\text{قرضه}}}{1+\omega_{\text{قرضه}}} = \dfrac{(\frac{W}{V})_{\text{قرضه}}}{1+\omega_{\text{قرضه}}} = \dfrac{۱۹/۸}{V_{\text{قرضه}} \times (1+۰/۱)} = \dfrac{۱۸}{V_{\text{قرضه}}}\ ton/m^۳ \\ V_{\text{اجرایی}} = ۵ \times ۰/۲ \times L = L \end{cases}$$

$$\frac{\rho_{d_{\text{اجرایی}}}}{\rho_{d_{\text{قرضه}}}} = \frac{V_{\text{قرضه}}}{V_{\text{اجرایی}}} \Rightarrow \frac{۱/۸}{\frac{۱۸}{V_{\text{قرضه}}}} = \frac{V_{\text{قرضه}}}{L} \Rightarrow L = ۱۰\ m$$

۱۲- (۳)

وزن دانه‌های جامد خاک در حالت نهایی (اجرایی) برابر مجموع وزن دانه‌های جامد در دو خاک اولیه است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$W_{s_1} + W_{s_2} = W_{s_{\text{اجرایی}}}$$

در فصل اول دیدیم که $W_s = \dfrac{W}{1+\omega}$ است، بنابراین با در اختیار داشتن W و ω در دو خاک اولیه، به‌سادگی W_{s_1} و W_{s_2} را می‌یابیم:

$$W_{s_1} = \frac{W_1}{1+\omega_1} = \frac{۱۷۶}{1+۰/۱} = ۱۶۰\ gr \quad , \quad W_{s_2} = \frac{W_2}{1+\omega_2} = \frac{۱۸۰}{1+۰/۲۵} = ۱۴۴\ gr$$

حال با توجه به اینکه $W_{s_{\text{اجرایی}}} = \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} \times V_{\text{اجرایی}}$ است، می‌نویسیم:

$$۱۶۰ + ۱۴۴ = \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} \times ۱۶۰ \Rightarrow \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = ۱/۹\ gr/cm^۳$$

و در نهایت براساس $RC = ۹۵\%$، مقدار $\gamma_{d_{max}}$ برابر خواهد بود با:

$$\gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \gamma_{d_{max}} \times RC \Rightarrow ۱/۹ = \gamma_{d_{max}} \times ۰/۹۵ \Rightarrow \gamma_{d_{max}} = ۲\ gr/cm^۳$$

۱۳- (۱)

مشابه با تست‌های قبل خواهیم داشت:

$$\frac{V_{\text{اجرایی}}}{V_{\text{قرضه}}} = \frac{\gamma_{d_{\text{قرضه}}}}{\gamma_{d_{\text{اجرایی}}}}$$

$$\begin{cases} V_{\text{اجرایی}} = ۵\ m^۳ \ \text{(طبق صورت سؤال)} \\ \gamma_{d_{\text{قرضه}}} = \dfrac{\gamma_{\text{قرضه}}}{1+\omega_{\text{قرضه}}} = \dfrac{۱/۶۵}{1+۰/۱} = ۱/۵\ t/m^۳ \\ \gamma_{d_{\text{اجرایی}}} = \gamma_{d_{max\ \text{آزمایشگاه}}} \times RC = ۱/۸ \times ۰/۹ \ \text{(بهتر است آن را ساده نکنید!)} \end{cases} \Rightarrow \frac{۵}{V_{\text{قرضه}}} = \frac{۱/۵}{۰/۹ \times ۱/۸} \Rightarrow V_{\text{قرضه}} = ۵/۴\ m^۳$$

۱۴- (۳)

همانطورکه در قسمت تکمیلی (در پایان فصل) گفته شد، منحنی‌های تراکم (الف)، (ب) و (ج) به‌ترتیب متعلق به خاک‌های ذکر شده در گزینهٔ (۳) می‌باشند.

۱۵- (۲)

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \Rightarrow ۰/۸ = \frac{۱/۱ - e}{۱/۱ - ۰/۳۵} \Rightarrow e = ۰/۵$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{۲/۵ \times ۱۰}{1+۰/۵} = ۱۶/۷\ kN/m^۳$$

سری عمران

فصل ۴: حرکت آب در خاک

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

حرکت آب در خاک (تراوش) یکی از مباحث مهم در مکانیک خاک است که به هنگام ساخت سازه در مجاورت آب رودخانه، دریا، نزدیکی آب‌های زیرزمینی و ... بایستی به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

احتمالاً از مکانیک سیالات به یاد دارید که هرگاه بین دو نقطه، انرژی ذرات آب متفاوت باشد، آب بین آن دو نقطه حرکت خواهد کرد. جالب است بدانید که در مکانیک خاک نیز هرگاه انرژی ذرات آب موجود در خاک، بین دو نقطه متفاوت باشد، آب بین آن دو نقطه حرکت می‌کند که اصطلاحاً به آن تراوش آب در خاک می‌گوییم.

در این فصل می‌خواهیم مفهوم تراوش آب در خاک را در حالت‌های یک بعدی و دو بعدی به‌طور کامل مورد بررسی قرار دهیم ولی قبل از آن لازم است تا مفاهیم مهمی مثل مفهوم انرژیِ جریان، رابطهٔ برنولی، گرادیان هیدرولیکی، قانون دارسی و ... را یاد بگیریم. بر همین اساس قسمت‌های مختلف این فصل به‌صورت نمودار درختی زیر می‌باشد.

حرکت آب در خاک
- قسمت اول: آشنایی با مفهوم انرژی آب در خاک
- قسمت دوم: مفهوم گرادیان هیدرولیکی و محاسبه سرعت حرکت آب در خاک
- قسمت سوم: تراوش یک بعدی آب در خاک‌های لایه بندی شده
- قسمت چهارم: حرکت دو بعدی آب در خاک و بررسی شبکهٔ جریان
- قسمت پنجم: مباحث تکمیلی حرکت آب در خاک

A-۱- یادآوری برخی مفاهیم پایه از فیزیک و مکانیک سیالات

اصولاً وقتی در مورد انرژی یک سیال مانند آب بحث می‌شود، این انرژی را باید به سه قسمت تفکیک کنیم:

قسمت اول: انرژی ناشی از سرعت ذرات آب (انرژی جنبشی)

قسمت دوم: انرژی ناشی از نیروی گرانش یا وزن ذرات آب (انرژی پتانسیل)

قسمت سوم: انرژی ناشی از فشار هیدرواستاتیک آب (انرژی فشاری)

ما در این بخش می‌خواهیم ابتدا مروری بر مفاهیم این سه نوع انرژی داشته باشیم و سپس به بررسی اصل برنولی و مفهوم دبی جریان بپردازیم.

قسمت اول: انرژی جنبشی

از فیزیک دورهٔ دبیرستان به خاطر داریم که اگر گلوله‌ای به جرم m با سرعت V در حال حرکت باشد، انرژی ناشی از این سرعت برابر $K=\frac{۱}{۲}mV^{۲}$ است. در مهندسی عمران با تقسیم انرژی جنبشی بر وزن سیال، کمیتی به‌نام **هدِ سرعت** را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\text{هدِ سرعت} = \frac{\text{انرژی جنبشی}}{\text{وزن سیال}} = \frac{\frac{۱}{۲}mV^{۲}}{mg} = \frac{V^{۲}}{۲g} \Rightarrow \boxed{h_v = \frac{V^{۲}}{۲g}}$$

قسمت دوم: انرژی پتانسیل

از درس فیزیک می‌دانیم که برای تعیین انرژی پتانسیل ناشی از وزن یک جسم به جرم m، بایستی گام‌های زیر را طی کنیم:

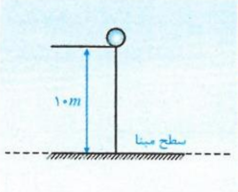
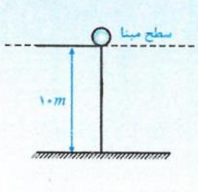
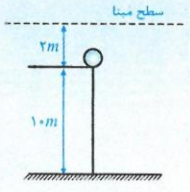
۱) یک سطح دلخواه را به‌عنوان سطح مبنا در نظر گرفته و فاصلهٔ قائم جسم را از آن، با z نشان می‌دهیم.

۲) انرژی پتانسیل جسم را از رابطه $U=mgz$ محاسبه می‌کنیم.

در مهندسی عمران با تقسیم انرژی پتانسیل بر وزن سیال، کمیتی به‌نام **هدِ ارتفاع** یا **هدِ رقوم** را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\text{هدِ ارتفاع} = \frac{\text{انرژی پتانسیل}}{\text{وزن سیال}} = \frac{mgz}{mg} = z \Rightarrow \boxed{h_z = z}$$

تذکر: علامت z با توجه به سطح مبنایی که انتخاب کرده‌اید سنجیده می‌شود و انتخاب سطح مبنا نیز کاملاً اختیاری است. برای درک بهتر این موضوع به جدول زیر توجه کنید:

سطح مبنای فرضی			
فاصله تا سطح مبنا	$z=+۱۰\,m$	$z=۰$	$z=-۲\,m$
انرژی پتانسیل	$mgz=mg\times(+۱۰)$	$mgz=۰$	$mgz=mg\times(-۲)$

قسمت اول: آشنایی با مفهوم انرژی آب در خاک

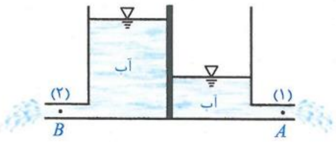
زیر شاخه‌های قسمت اول

A-۱- یادآوری برخی مفاهیم پایه از فیزیک و مکانیک سیالات

A-۲- بررسی مفاهیم حرکت آب در خاک

قسمت سوم: انرژی فشاری

شکل زیر را در نظر بگیرید که در آن یک مخزن آب توسط یک دیواره به دو قسمت تقسیم شده است و ارتفاع آب در دو طرف دیواره متفاوت است.



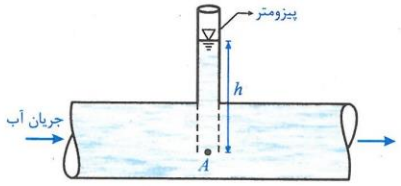
احتمالاً متوجه شده‌اید که به ذرهٔ B فشار بیشتری نسبت به ذرهٔ A وارد می‌شود تا آن را از لولهٔ قرار گرفته در انتهای مخزن بیرون بفرستد. اینکه تمایل ذرهٔ B به خروج از لوله بیشتر از ذرهٔ A است، نشان می‌دهد که انرژی فشاری ذرهٔ B بیشتر از ذرهٔ A است. دقت شود کـه انـرژی فشاری که به آن انرژی جریانی نیز گفته می‌شود، برخلاف دو انرژی قبلی فقط مربوط به سیالات است. می‌توان ثابت کرد که **هدِ فشار** (انرژی فشاری تقسیم بر وزن سیال) از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{هدِ فشار} = \frac{\text{انرژی فشاری}}{\text{وزن سیال}} = \frac{\text{فشار هیدرواستاتیک}}{\text{وزن مخصوص}}^{*} \Rightarrow h_p = \frac{P}{\gamma}$$

تذکر ۱: در ظرف زیر اگر بخواهیم فشار آب و هدِ فشار در یک نقطه را محاسبه کنیم، به‌سادگی از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم:

$$P_A = \gamma_w\, h \Rightarrow h_p = \frac{P}{\gamma_w} = h$$

تذکر ۲: در لولهٔ نشان داده شده در شکل زیر، آب جریان دارد و ما می‌خواهیم فشار آب در نقطهٔ A را حساب کنیم. چون سطح آزاد واقعی در بالای نقطهٔ A وجود ندارد، بایستی به آب اجازه دهیم تا برای خود یک سطح آزاد ایجاد کند. به‌همین دلیل در بـالای نقطـهٔ A یـک لولـهٔ شیشه‌ای قائم به‌نام **پیزومتر** قرار می‌دهیم و اجازه می‌دهیم تا آب به علت فشار مجرای بسته، در پیزومتر بالا رود. در این شرایط فـشار و هـدِ فشار در نقطهٔ A برابر است با:



$$P_A = \gamma_w\, h \Rightarrow h_p = \frac{P}{\gamma_w} = h$$

این موضوع نشان می‌دهد که ارتفاع قائم ستون آب در پیزومتر، همان هد فشار است.

در ادامهٔ بحث، پس از آشنا شدن با قسمت‌های مختلف انرژی و نحوهٔ محاسبهٔ انواع هد در یک سیال مانند آب، به بررسی اصل برنولی می‌پردازیم.

اصل برنولی

برنولی در قرن هجدهم میلادی اصل مهمی را در علم مکانیک سیالات بیان کرد که از پایه‌های این علم به حساب می‌آید. با توجـه بـه اصـل برنولی، وقتی بین دو نقطه از یک سیال اختلاف انرژی وجود داشته باشد، بین آن دو نقطه جریان برقرار می‌شود و سیال از نقطه‌ای با انـرژی بیشتر به سمت نقطه‌ای با انرژی کمتر حرکت می‌کند. منظور از انرژی در اینجا، **هدِکل** است که مجموع هدِ ارتفاع، هـدِ سرعت و هـدِ فـشار بوده و اگر سیال موردنظر آب باشد، به آن **بار آبی کل** نیز می‌گوییم:

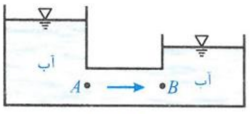
$$H = h_z + h_v + h_p \quad (h_z \to z,\; h_v \to \frac{V^2}{2g},\; h_p \to \frac{P}{\gamma_w}) \Rightarrow H = z + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma_w}$$

تذکر ۱: ما در مکانیک خاک با حرکت آب سر و کار داریم، بنابراین سیال مورد نظر در معادلهٔ برنـولی همـواره آب اسـت و بایـستی از ایـن معادله به فرم بالا (یعنی در معادله $\gamma = \gamma_w$ لحاظ شود) **استفاده کنیم.**

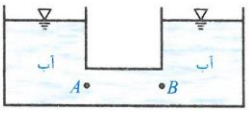
تذکر ۲: واحد هدِکل و هدهای تشکیل‌دهندهٔ آن، واحد طول (مثل متر) می‌باشد.

$$* \quad h_p = \frac{E_p}{W} = \frac{F_p \times L}{\gamma \times \forall} = \frac{PA \times L}{\gamma \times AL} = \frac{P}{\gamma}$$

تذکر ۳: به شکل‌های زیر توجه کنید. با کمی دقت به سادگی می‌توان گفت که در شکل (۱)، آب در لولهٔ AB، از نقطهٔ A به سمت نقطهٔ B حرکت می‌کند و این موضوع یعنی هدِکل در نقطهٔ A بیشتر از هدِکل در نقطهٔ B است. از سوی دیگر در شکل (۲)، هدِکل در دو نقطهٔ A و B برابر بوده و جریانی در لولهٔ AB به‌وجود نمی‌آید.

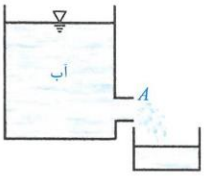


شکل (۱)



شکل (۲)

مفهوم دبی جریان



مخزن شکل مقابل را در نظر بگیرید که آب را از طریق روزنه‌ای به مساحت ۰/۰۳ m^2 به درون ظرفی کوچکتر به حجم ۰/۸ m^3 تخلیه می‌کند. اگر در مدت ۴۰ ثانیه این ظرف پر شود، نشان‌دهندهٔ آن است که ۰/۸ m^3 از آب ظرف در مدت ۴۰ ثانیه از روزنه عبور کرده است.

حال اگر از ما بپرسند که مقدار حجم آب عبوری از روزنه در واحد زمان (یک ثانیه) چقدر است، برای پاسخ به این سؤال کافی است تا حجم ظرف را به زمان پر شدن آن تقسیم کنیم که حاصل برابر ۰/۰۲ m^3/s ($\frac{0/8}{40}=0/02$) خواهد بود. به این مقدار، **دبی عبوری** از مقطع روزنه گفته می‌شود.

در حالت کلی دبی عبوری از یک مقطع را می‌توان به‌صورت زیر تعیین کرد:

$$\text{دبی} = \frac{\text{حجم}}{\text{زمان}} = \frac{A \times L}{t} = A \times \underbrace{\frac{L}{t}}_{V\ (\text{سرعت})} \Rightarrow Q = VA$$

در رابطهٔ بالا V سرعت متوسط جریان و A مساحت مقطع عمود بر جریان است.

تذکر ۱: واحدهای دبی عبارتند از m^3/s، L/s (lit/s =لیتر بر ثانیه) و cm^3/s که به‌صورت زیر قابل تبدیل به هم می‌باشند:

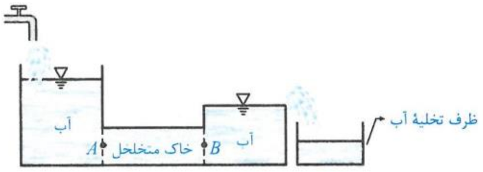
$$m^3/s \underset{\div 1000}{\overset{\times 1000}{\rightleftarrows}} L/s \underset{\div 1000}{\overset{\times 1000}{\rightleftarrows}} cm^3/s$$

تذکر ۲: سرعت جریان در مثال گفته شده را می‌توان با استفاده از مساحت روزنه و مقدار دبی، به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$Q = VA \Rightarrow 0/02 = V \times 0/03 \Rightarrow V = \frac{2}{3}\,m/s$$

A-۲- بررسی مفاهیم حرکت آب در خاک

به‌طور کلی می‌توان گفت در مکانیک خاک نیز وقتی در دو نقطه از خاک اختلاف هدِکل وجود داشته باشد، آب در خاک حرکت می‌کند. برای درک بهتر این موضوع، شکل زیر را در نظر بگیرید. در این شکل، داخل لولهٔ AB خاک متخلخلی مثل ماسه ریخته شده است. با کمی دقت می‌توان گفت که به‌دلیل وجود حفره‌های موجود در خاک و نیز بالا بودن سطح آب سمت چپ نسبت به سمت راست، آب در خاک از A به B حرکت کرده و در اصطلاح **تراوش** رخ می‌دهد.



در ادامه با چند تذکر به درک بهتر این شکل کمک می‌کنیم:

تذکر ۱: به‌هنگام حرکت آب در خاک، آب مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد. در این حالت مشاهده می‌شود که حرکت آب در خاک همواره از انرژی بیشتر به سمت انرژی کمتر است (از نقطه A به سمت نقطه B).

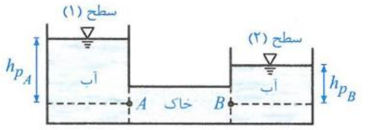
تذکر ۲: به علت مواجه شدن آب با ذرات خاک، سرعت جریان آب در خاک کم است و می‌توان گفت هد سرعت ناچیز بوده و تقریباً برابر صفر است. مثلاً اگر سرعت حرکت آب در خاک را ۱۰cm/s در نظر بگیریم (که سرعت بالایی برای حرکت آب در خاک محسوب می‌شود)، هد سرعت برابر می‌شود با:

$$\text{مثلاً}: V = 10\,cm/s = 0/1\,m/s \Rightarrow h_v = \frac{V^2}{2g} = \frac{0/1^2}{2 \times 10} = 0/0005 \simeq \text{صفر}$$

تذکر ۳: با توجه به تذکر (۲) می‌توان گفت که هدکل (بار آبی کل) در حرکت آب در خاک، با صرف‌نظر از مقدار ناچیز هدِ سرعت، فقط شامل هد ارتفاع (h_z) و هد فشار (h_p) است. از طرفی در مکانیک خاک، فشار آب قرار گرفته در داخل حفره‌های خاک را با u نشان داده و به آن **فشار آب حفره‌ای** می‌گوییم. بنابراین معادله برنولی در حالت تراوش آب در خاک به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$H = h_z + h_p = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

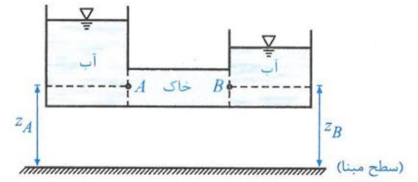
تذکر ۴: مخزن واقع در سمت چپِ نقطهٔ A در حکم پیزومتری است که در نقطهٔ A قرار گرفته است، بنابراین فاصلهٔ قائم نقطهٔ A از سطح آزاد آب در سمت چپ، هد فشار در نقطهٔ A (h_{p_A}) می‌باشد. در مورد نقطهٔ B نیز می‌توان مشابه همین استدلال را به‌کار برد و هد فشار (h_{p_B}) را مشخص کرد:



$$\begin{cases} u_A = h_{p_A}\,\gamma_w \\ u_B = h_{p_B}\,\gamma_w \end{cases}$$

لازم به ذکر است که سطوح (۱) و (۲) را به‌ترتیب **تراز پیزومتریک** (یا **تراز پیزومتری**) نقاط A و B می‌نامیم.

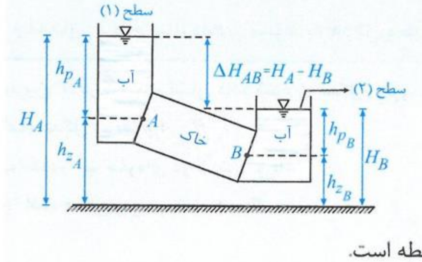
تذکر ۵: اگر یک سطح مبنای دلخواه را مطابق شکل زیر در نظر بگیریم، فاصلهٔ نقاط A و B از سطح مبنا نشان‌دهندهٔ هد ارتفاع این نقاط است که در شکل زیر با z_A و z_B نمایش داده شده‌اند.



در ادامه مطالب گفته شده را به‌صورت زیر جمع‌بندی می‌کنیم:

جمع‌بندی و تکمیل مطالب گفته شده

شکل زیر را که فرم کلی‌تری نسبت به شکل‌های قبلی دارد، در نظر بگیرید. با توجه به مطالب گفته شدهٔ قبلی می‌توان در مورد این شکل به‌صورت زیر اظهار نظر کرد:



۱) فاصلهٔ قائم هر نقطه تا سطح مبنا با h_z نشان داده می‌شود و نشانگر هد ارتفاع آن نقطه است.

۲) فاصله قائم هر نقطه تا سطح آب در پیزومترِ مربوط به آن نقطه، با h_p نشان داده می‌شود و معرف هد فشار آن نقطه است.

۳) فاصله قائم سطح آب در پیزومترِ مربوط به هر نقطه تا سطح مبنا با H نشان داده می‌شود و بیانگر هدِکل یا بار آبی کل آن نقطه است.

۴) اختلاف قائم سطح آب در پیزومترهای مربوط به دو نقطه (اختلاف تراز پیزومتری)، نشان‌دهندهٔ افت هدِکل بین آن دو نقطه است که با ΔH نشان داده می‌شود. توجه کنید که برای محاسبهٔ ΔH، هدکل بزرگ‌تر منهای هدکل کوچکتر می‌شود و به‌همین دلیل این پارامتر همواره مثبت می‌باشد.

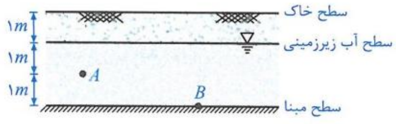
۵) برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای، کافی است تا هد فشار را در وزن مخصوص آب ضرب کنید:

$$u = h_p \times \gamma_w = (H - h_z) \times \gamma_w$$

در ادامه به حل دو تمرین، می‌پردازیم. در تمرین اول نحوهٔ محاسبهٔ انواع هد را بررسی کرده و در تمرین بعد، کاربرد نکات فوق را یاد می‌گیریم.

تمرین ۱: **در شکل زیر سطح آب زیرزمینی در یک پروفیل خاک نشان داده شده است و آب در خاک حرکت ندارد.** $(\gamma_w = 10\, kN/m^3)$

الف) درصورتی‌که در نقاط A و B یک پیزومتر قرار دهیم، سطح آب پیزومتر در چه ترازی می‌ایستد؟



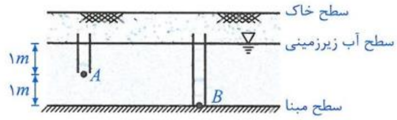
ب) هد فشار و فشار آب حفره‌ای در نقاط A و B را تعیین کنید.

ج) هدکل و هد ارتفاع در نقاط A و B چقدر (بر حسب متر) می‌باشند؟

د) اگر سطح مبنا یک متر پایین بیاید، هدِ فشار، هدِ ارتفاع و هدِ کل در نقاط A و B چه تغییری می‌کنند؟

● حل:

الف) با توجه به اینکه آب در خاک حرکت ندارد و فقط یک سطح آزاد آب (تراز پیزومتری) که در اینجا سطح سفرهٔ آب زیرزمینی است داریم، می‌توان گفت که این تراز پیزومتری نشان‌دهندهٔ سطح آزاد آب در همهٔ پیزومترهایی است که می‌توان در خاک قرار داد (به زبان ساده‌تر، اگر در هر نقطه از خاک یک پیزومتر قرار دهیم، آب داخل پیزومتر تا این سطح بالا می‌آید). بنابراین سطح آب پیزومتر در نقاط A و B منطبق بر سطح سفرهٔ آب زیرزمینی است. شکل روبرو این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد.



ب) با توجه به شکل بالا، می‌توان گفت:

$$h_{p_A} = 1\,m \Rightarrow u_A = h_{p_A} \times \gamma_w = 1\times 10 = 10\, kN/m^2 \quad , \quad h_{p_B} = 2\,m \Rightarrow u_B = h_{p_B} \times \gamma_w = 2\times 10 = 20\, kN/m^2$$

ج) باز هم با توجه به شکل فوق می‌توان گفت:

$$z_A = 1\,m \;,\; H_A = h_{z_A} + h_{p_A} = 1+1 = 2\,m \quad , \quad z_B = 0 \;,\; H_B = h_{z_B} + h_{p_B} = 0+2 = 2\,m$$

د) با جابه‌جا شدن سطح مبنا به اندازهٔ یک متر به سمت پایین، فاصله سطح آبِ پیزومتر تا نقاط A و B تغییر نمی‌کند، بنابراین هد فشار نیز تغییر نکرده و ثابت می‌ماند. این در حالی است که هد ارتفاع و هدکل در نقاط A و B هر دو به اندازهٔ یک متر افزایش می‌یابند زیرا فاصله سطح آبِ پیزومتر و خود نقاط A و B از سطح مبنا، یک متر اضافه می‌شود.

نتیجه کاربردی

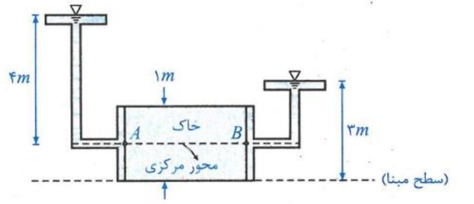
مقدار هدِ فشار از انتخاب سطح مبنا مستقل است، یعنی اگر سطح مبنا در خاک جابه‌جا شود، هد فشار تغییر نمی‌کند. در این حالت با جابه‌جایی سطح مبنا، مقادیر مربوط به هدِکل و هدِ ارتفاع هر دو به یک اندازه تغییر می‌کنند.

تمرین ۲: **در سیستم نشان داده شده در شکل روبرو، مطلوب است تعیین:**

الف) هدکل در نقاط A و B

ب) فشار آب حفره‌ای در نقاط A و B

ج) افت هدکل بین دو نقطهٔ A و B



● حل:

الف) همانطور که می‌دانیم برای تعیین هدِکل در هر نقطه، کافی است تا فاصلهٔ قائم سطح آبِ پیزومتر تا سطح مبنا را برای آن نقطه به‌دست آوریم، از این‌رو می‌نویسیم:

با توجه به سطح آزاد سمت چپ $\Rightarrow H_A = 4 + \frac{1}{2}\times 1 = 4/5\, m$, با توجه به سطح آزاد سمت راست $\Rightarrow H_B = 3\, m$

ب) فشار آب حفره‌ای در هر نقطه از حاصل‌ضرب هد فشار در وزن مخصوص آب به‌دست می‌آید. می‌دانیم هد فشار در هر نقطه نیز فاصله قائم آن نقطه تا سطح آبِ پیزومترش (همان ارتفاع ستون آب در پیزومتر) است، بنابراین می‌نویسیم:

با توجه به فاصلهٔ A از سطح آزاد سمت چپ $\Rightarrow h_{p_A} = 4\, m \Rightarrow u_A = h_{p_A} \times \gamma_w = 4\times 10 = 40\, kN/m^2$

با توجه به فاصلهٔ B از سطح آزاد سمت راست $\Rightarrow h_{p_B} = 3 - \frac{1}{2}\times 1 = 2/5\, m \Rightarrow u_B = h_{p_B} \times \gamma_w = 2/5\times 10 = 25\, kN/m^2$

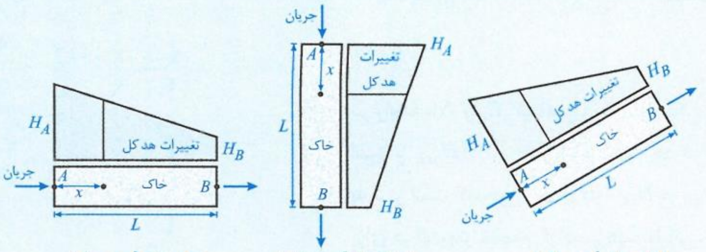
ج) $\Delta H_{AB} = H_A - H_B = 4/5 - 3 = 1/5\, m$

حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که اگر فشار یا هدِکل در نقطه‌ای بین A و B (مثلاً وسط آنها) خواسته شود، در آن‌صورت چه باید کرد؟ برای پاسخ به این سؤال، شما را با یک اصل اساسی و مهم آشنا می‌کنیم.

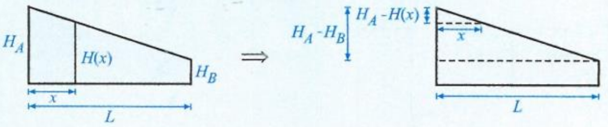
یک اصل اساسی

در جریان یک بعدی آب در یک خاک مشخص (منظور خاک با مشخصات ثابت)، تغییرات هدِکل و فشار آب حفره‌ای در هر صورت (منظور در هر امتدادی) خطی می‌باشند و ما می‌توانیم مقادیر آنها را در فاصله x از نقطه‌ای که بیشترین هدِ کل یا فشار آب حفره‌ای را دارد (نقطهٔ A در شکل‌های رسم شده) به‌صورت زیر به‌دست آوریم:

الف) محاسبه هدِ کل $H(x)$



(تراوش افقی آب در خاک) (تراوش قائم آب در خاک) (تراوش مایل آب در خاک)

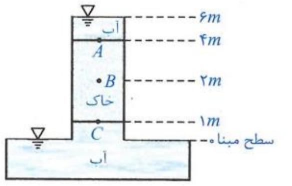


$$\text{قضیهٔ تالس} \Rightarrow \frac{H_A - H_B}{L} = \frac{H_A - H(x)}{x} \Rightarrow H(x) = H_A - (\frac{H_A - H_B}{L})\,x$$

ب) محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای $u(x)$

برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای نیز مانند محاسبه هدِ کل عمل می‌کنیم که نتیجهٔ آن به فرم مقابل است: $u(x) = u_A - (\frac{u_A - u_B}{L})\,x$

تمرین ۳: هدکل و فشار آب حفره‌ای نقطهٔ B از خاک به‌ترتیب کدام است؟



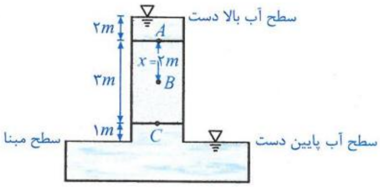
۱) $u_B = \frac{۲}{۳}\gamma_w$ و $H_B = ۲\,m$

۲) $u_B = ۰$ و $H_B = \frac{۸}{۳}\,m$

۳) $u_B = \frac{۲}{۳}\gamma_w$ و $H_B = \frac{۸}{۳}\,m$

۴) $u_B = ۰$ و $H_B = ۲\,m$

حل: ابتدا باید دقت شود که سطح آزاد آب پایین دست، تراز پیزومتریک نقطه C محسوب می‌شود و سطح آزاد آب بالا دست نیز، تراز پیزومتریک نقطه A است:



$$\begin{cases} C \text{ فاصلهٔ سطح آزاد آب پایین دست از } = -۱m \Rightarrow h_{p_C} = -۱m \\ \text{فاصلهٔ سطح آزاد آب پایین دست از سطح مبنا} = ۰ \Rightarrow H_C = ۰ \end{cases}$$

$$\begin{cases} A \text{ فاصلهٔ سطح آزاد آب بالا دست از } = +۲m \Rightarrow h_{p_A} = +۲m \\ \text{فاصلهٔ سطح آزاد آب بالا دست از سطح مبنا} = +۶m \Rightarrow H_A = ۶m \end{cases}$$

در ادامه برای تعیین هدکل و فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B (که بین A و C است)، با توجه به تغییرات خطی هدِکل و فشار آب حفره‌ای در این خاک (با جنس ثابت)، به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\begin{cases} H_A = ۶\,m \\ H_C = ۰ \end{cases} \Rightarrow H_B = H_A - (\frac{H_A - H_C}{L})\,x = ۶ - (\frac{۶-۰}{۳}) \times ۲ = ۲\,m \quad (x_B = ۲\,m)$$

$$\begin{cases} u_A = ۲ \times \gamma_w = ۲\gamma_w \\ u_C = -۱ \times \gamma_w = -\gamma_w \end{cases} \Rightarrow u_B = u_A - (\frac{u_A - u_C}{L})\,x = ۲\gamma_w - (\frac{۲\gamma_w + \gamma_w}{۳}) \times ۲ = ۰ \quad (x_B = ۲\,m)$$

بنابراین گزینه (۴) درست است.

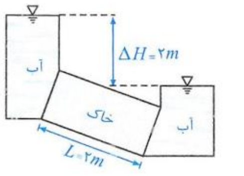
B-۱- گرادیان هیدرولیکی

همانطور که در قسمت قبل بیان شد، برای برقراری جریان بین دو نقطه از خاک، بایستی بین این دو نقطه اختلاف هد وجود داشته باشد. واضح است که هر چه در یک فاصلهٔ مشخص اختلاف هد بیشتر باشد، تمایل جریان برای حرکت بیشتر است. برای نشان دادن این تمایل از یک کمیت بدون بعد به نام **گرادیان هیدرولیکی** یا **شیب آبی** استفاده می‌کنیم که آن را با i نشان می‌دهیم و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$i = \frac{\Delta H_{AB}}{L_{AB}}$$

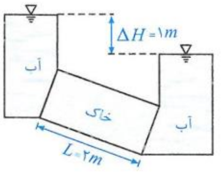
در رابطهٔ بالا، L_{AB} کوتاهترین مسیر ممکن برای حرکت آب در خاک بین دو نقطهٔ A و B است و ΔH_{AB} نیز نشان‌دهندهٔ افت هد در اثر پیمودن همین مسیر توسط آب می‌باشد. لازم به ذکر است که چون $\Delta H_{AB} = H_A - H_B > ۰$ می‌باشد، بنابراین $i > ۰$ است.

برای درک بهتر مفهوم گرادیان هیدرولیکی، به شکل‌های زیر که تنها از نظر مقدار ΔH با هم متفاوت‌اند، توجه کنید:



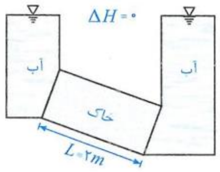
$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{۲}{۲} = ۱$

شکل (۱)



$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{۱}{۲} = ۰/۵$

شکل (۲)

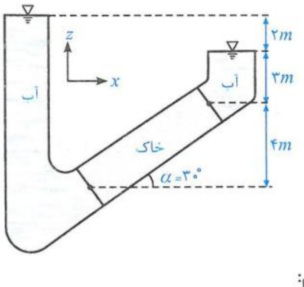


$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{۰}{۲} = ۰$

شکل (۳)

در شکل اول ΔH از همه بیشتر بوده و تمایل آب برای حرکت در خاک نیز در آن بیشتر است، این در حالی است که در شکل سوم $\Delta H = ۰$ است و هیچگونه تمایلی برای حرکت آب در خاک وجود ندارد (تراوش رخ نمی‌دهد).

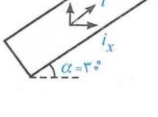
تمرین ۴: در شکل مقابل گرادیان هیدرولیکی را تعیین کرده و گرادیان هیدرولیکی در امتداد x و z را نیز مشخص کنید. به نظر شما اگر جنس خاک عوض شود، گرادیان هیدرولیکی چه تغییری می‌کند؟



حل: ابتدا طبق خواستهٔ صورت سؤال، مقدار i را می‌یابیم:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{۲}{\left(\frac{۴}{\sin ۳۰^\circ}\right)} = ۰/۲۵$$

برای تعیین گرادیان هیدرولیکی در امتداد x و z کافی است تا i را در این دو امتداد تجزیه کنیم. در این حالت خواهیم داشت:



$$i_x = i\cos\alpha = ۰/۲۵ \times \cos ۳۰^\circ = \frac{\sqrt{۳}}{۸}$$

$$i_z = i\sin\alpha = ۰/۲۵ \times \sin ۳۰^\circ = \frac{۱}{۸}$$

قسمت دوم: مفهوم گرادیان هیدرولیکی و عوامل حرکت آب در خاک

زیر شاخه‌های قسمت دوم

B-۱- گرادیان هیدرولیکی

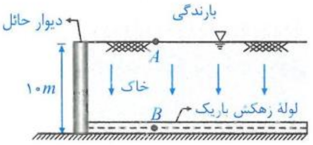
B-۲- بررسی قانون دارسی برای محاسبهٔ سرعت حرکت آب در خاک

در نهایت توجه می‌کنیم که اگر ΔH بین دو سر خاک ثابت باشد، تغییر در جنس خاک، باعث تغییر در گرادیان هیدرولیکی نمی‌شود زیرا i بستگی به ΔH و L دارد که هر دو مستقل از جنس خاک هستند. در بخش بعدی این قسمت $(B-۲)$ خواهیم دیدکه تغییر در جنس خاک باعث تغییر در سرعت حرکت آب در خاک می‌گردد.

در ادامه به دو تذکر کاربردی زیر در ارتباط با این تمرین توجه کنید:

۱) i_x نمایندهٔ تمایل آب برای حرکت افقی در خاک بوده و i_z نیز نمایندهٔ تمایل آب برای حرکت قائم در خاک است، هر چند در مجموع حرکت آب در خاک یک بعدی بوده و در امتداد i است.

۲) در جریان یک‌بعدی آب در خاک، با حرکت آب در خاک، گرادیان هیدرولیکی ثابت بوده و تغییر نمی‌کند.



تمرین ۵: در شکل مقابل، آب‌های ناشی از بارندگی به‌صورت جریان مداوم در امتداد قائم به زهکش می‌رسند. گرادیان هیدرولیکی در خاک پشت دیوار در اثر این تراوش کدام است؟ (راهنمایی: در محل لولهٔ زهکش، فشار آب حفره‌ای تخلیه می‌شود و برابر صفر است.)

● حل: آب ناشی از بارندگی، از سطح خاک به سمت لولهٔ زهکش می‌رود و از آنجا تخلیه می‌گردد. در این شرایط اگر سطح مبنا را در تراز نقطهٔ B در نظر بگیریم (این کار را در ذهن خود بر روی شکل فوق انجام دهید) در آن‌صورت مقدار گرادیان هیدرولیکی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

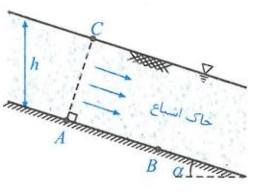
$$H_A=\frac{u_A}{\gamma_w}+h_{z_A}=۰+۱۰=۱۰\,m$$ (A روی سطح آب زیرزمینی بوده و فشارش صفر است)

$$H_B=\frac{u_B}{\gamma_w}+h_{z_B}=۰+۰=۰$$ (B روی سطح مبنا قرار دارد و فشار آن نیز طبق صورت سؤال، به دلیل زهکش صفر شده است)

$$\Rightarrow\ i=\frac{\Delta H_{AB}}{L_{AB}}=\frac{H_A-H_B}{L_{AB}}=\frac{۱۰-۰}{۱۰}=۱$$

نتیجه کاربردی و مهم

اختلاف هدکل بین دو نقطه از خاک، مستقل از محل انتخابی برای سطح مبناست، بنابراین در حل مسئله‌های مختلف توصیه می‌شود تا سطح مبنا را طوری انتخاب کنید که کار محاسبات شما ساده‌تر گردد. به شما توصیه می‌کنیم که معمولاً محل سطح آزاد آب یا پایین‌ترین تراز موجود در شکل را به‌عنوان محل مناسب برای سطح مبنا انتخاب کنید، هر چند در برخی از مسئله‌ها می‌توان ترازهای دیگری را هم در نظر گرفت.



تمرین ۶: در شکل مقابل جریان آب به موازات سطح خاک (سطح شیبدار) برقرار است:

الف) آیا بین دو نقطهٔ A و C اختلاف هد وجود دارد؟

ب) با توجه به پاسخ قسمت (الف) چگونه می‌توان h_p در نقطهٔ A را تعیین کرد؟

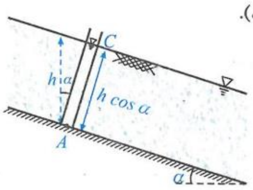
ج) فشار در نقطهٔ B چگونه محاسبه می‌شود؟

د) اختلاف هدکل بین دو نقطهٔ A و B چگونه محاسبه می‌شود؟

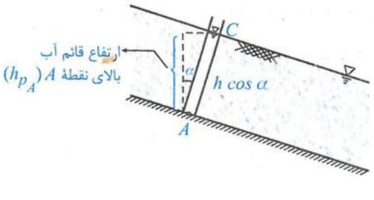
هـ) گرادیان هیدرولیکی جریان چقدر است؟

● حل:

الف) از آنجائیکه امتداد AC عمود بر امتداد جریان است، پس در این امتداد جریانی وجود نداشته و این موضوع یعنی اختلاف هدی بین دو نقطهٔ A و C نداریم (اگر اختلاف هد بین A و C وجود داشت، لزوماً بین آنها جریان به‌وجود می‌آمد).



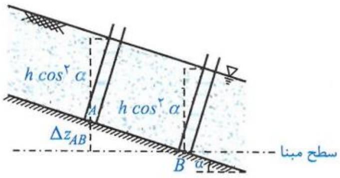
ب) با توجه به پاسخ قسمت (الف)، تراز پیزومتری نقاط A و C یکسان بوده و سطح آب در پیزومتر قرار گرفته در نقطهٔ A، متعلق به نقطهٔ C هم می‌باشد و به‌صورت شکل مقابل است:



شاید اکنون به این فکر می‌کنید که هد فشار (h_p) در نقطهٔ A برابر ارتفاع ستون آب در پیزومتر یعنی $h\cos\alpha$ است ولی این فکر اشتباه است! زیرا h_p **ارتفاع قائم** ستون آب در پیزومتر در بالای نقطه مورد نظر است، یعنی:

$$h_{p_A}=AC\times\cos\alpha=h\cos\alpha\times\cos\alpha=h\cos^2\alpha$$

ج) محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B هم دقیقاً مثل محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A است. برای درک بهتر این موضوع به شکل مقابل توجه کنید:



$$u_A = u_B = h_p \times \gamma_w = h\cos^2\alpha \times \gamma_w = \gamma_w\ h\cos^2\alpha$$

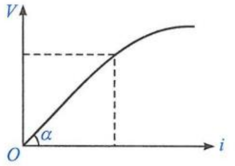
د) برای محاسبهٔ اختلاف هدِکل بین دو نقطهٔ A و B، سطح مبنا را روی نقطهٔ B (سطح پایین‌تر) انتخاب کرده و می‌نویسیم:

$$\Delta H_{AB} = H_A - H_B = (h_{p_A} + h_{z_A}) - (h_{p_B} + h_{z_B}) = (h\cos^2\alpha + \Delta z_{AB}) - (h\cos^2\alpha + 0) = \Delta z_{AB}$$

ه) در نهایت مقدار گرادیان هیدرولیکی در این شکل برابر است با:

$$i = \frac{\Delta H_{AB}}{L_{AB}} = \frac{\Delta z_{AB}}{L_{AB}} = \sin\alpha$$

B-۲- بررسی قانون دارسی برای محاسبهٔ سرعت حرکت آب در خاک



تلاش‌های محققین علم مکانیک خاک برای محاسبهٔ سرعت حرکت آب در خاک، سرانجام در سال ۱۸۵۶ توسط دارسی به نتیجه رسید و او با انجام آزمایش‌های متعدد متوجه شد که برای جریان‌های آرام*، این سرعت با گرادیان هیدرولیکی جریان متناسب بوده و با آن رابطهٔ خطی دارد:

$$V \propto i$$

در ادامه دارسی تناسب فوق را به تساوی تبدیل کرد و ضریب تناسب را **ضریب هدایت هیدرولیکی** یا **ضریب نفوذپذیری خاک** (k) نامید. روند زیر نحوهٔ به‌دست آمدن رابطهٔ دارسی برای محاسبهٔ سرعت جریان آب در خاک را نشان می‌دهد:

$$V = k\ i \Rightarrow V = ki$$

ضریب تناسب که همان ضریب نفوذپذیری خاک می‌باشد.

نکات مهم در ارتباط با قانون دارسی:

۱) ضریب نفوذپذیری (k) از ویژگی‌های خاک است که به نوع خاک و شرایط محیط بستگی دارد.

۲) چون i بدون واحد است، بنابراین واحد k و V یکسان بوده و معمولاً برحسب cm/s (به علت سرعت کم حرکت آب در خاک) بیان می‌شوند.

۳) محدودهٔ تغییرات نفوذپذیری در انواع خاکها را می‌توان در جدولی به‌صورت زیر بیان کرد:

نوع خاک	$k\ (cm/s)$	درجه نفوذپذیری
شن شسته (تمیز)	۱۰~۱	بالا
ماسه شسته - مخلوط شن و ماسه	۱~۰/۰۰۱	متوسط
ماسه ریز - لای‌ها	۰/۰۰۱ ~ 10^{-5}	پایین
مخلوط ماسه، لای و رس	10^{-5} ~ 10^{-7}	خیلی پایین
رس همگن	$<10^{-7}$	تقریباً نفوذناپذیر

همانطور که ملاحظه می‌کنید، محدودهٔ تغییرات k بسیار گسترده بوده و مثلاً ممکن است ضریب نفوذپذیری یک خاک 10^5 برابر خاک دیگر باشد. نکته جالب توجه در مورد جدول فوق این است که ضریب نفوذپذیری درشت دانه‌ها بیشتر از ریزدانه‌هاست که البته این موضوع کاملاً منطقی است، زیرا درشت‌دانه‌ها خلل و فرج بزرگتری دارند و حرکت آب در آنها آسان‌تر است.

* ملاک دارسی برای آرام بودن جریان آب در خاک، اعداد رینولدز کوچکتر از ۱۰ ($Re<10$) بوده است.

۴) رابطهٔ دارسی برای اکثر خاک‌ها قابل استفاده است ولی برای شن‌های تمیز برقرار نیست. علت این موضوع را می‌توان در بزرگتر بودن خلل و فرج شن‌های تمیز دانست که باعث می‌شود تا جریان آب آرام نباشد.

۵) با استفاده از رابطهٔ دارسی می‌توان دبی عبوری از یک مقطع خاک را به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} Q = VA \\ V = ki \\ i = \dfrac{\Delta H}{L} \end{cases} \Rightarrow \boxed{Q = VA = kiA = kA\left(\dfrac{\Delta H}{L}\right)}$$

که در روابط بالا، A مساحت کل مقطع خاک در امتداد عمود بر جریان است.

حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که مگر آب از کل مقطع خاک می‌گذرد و اصولاً دانه‌های جامد در این حالت چه می‌شوند و چرا نادیده گرفته شده‌اند؟

برای پاسخ به این سؤال لازم است تا قانون دارسی را دقیق‌تر بررسی کنیم.

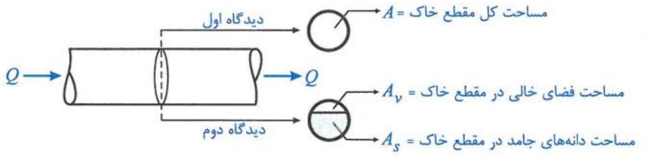
بررسی دقیق‌تر قانون دارسی

در بررسی سرعت حرکت آب در خاک دو دیدگاه مطرح است:

دیدگاه اول (دیدگاه دارسی): همانطور که دیدیم دارسی فرض می‌کند که حرکت آب در خاک از کل مقطع خاک انجام می‌شود. سرعت مطرح شده در دیدگاه دارسی یک سرعت غیر واقعی یا ظاهری است که به نوعی مقدار متوسطی را برای سرعت حرکت آب در خاک مطرح می‌نماید. از این‌رو به این سرعت، **سرعت ظاهری** یا **سرعت متوسط** می‌گویند.

دیدگاه دوم (دیدگاه واقعی): در واقعیت آب نه از کل مقطع خاک، بلکه از فضای خالی آن عبور می‌کند، پس **سرعت واقعی** جریان که به آن **سرعت تراوش** نیز گفته می‌شود با سرعت مطرح شده در رابطهٔ دارسی (سرعت ظاهری) متفاوت است.

حال در ادامه می‌خواهیم ارتباط بین سرعت ظاهری (V) و سرعت واقعی (V_s) جریان را بیابیم. برای این منظور کافی است به دو شکل زیر توجه کنید و بدانید که در نهایت یک دبی مشخص از خاک عبور می‌کند:



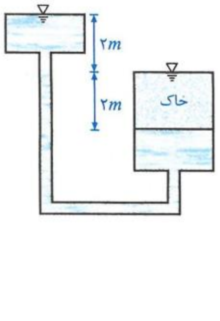
دبی دیدگاه اول = دبی دیدگاه دوم $\Rightarrow V \times A = V_s \times A_v \Rightarrow V_s = \left(\dfrac{A}{A_v}\right) \times V = \dfrac{V}{\left(\dfrac{A_v}{A}\right)} \Rightarrow \boxed{V_s = \dfrac{V}{n}}$

$\left(\dfrac{A_v}{A}\right)$ ← تخلخل یا پوکی (n)

تذکر: با توجه به اینکه $n < 1$ است، بنابراین سرعت واقعی جریان (V_s)، واقعاً بیشتر از سرعت ظاهری (V) می‌باشد که البته کاملاً منطقی به‌نظر می‌رسد.

حال بیایید با حل تمرین‌های زیر، کاربرد قانون دارسی را ببینیم.

تمرین ۷: یک نمونه خاک اشباع و استوانه‌ای به قطر ۲۰ cm مطابق شکل زیر موجود است. ضریب نفوذپذیری خاک برابر ۰/۰۴ cm/s و نسبت تخلخل آن برابر $e =$ ۰/۵ می‌باشد. سرعت تراوش و دبی جریان به‌ترتیب کدامند؟ ($\pi = 3$)



۱) ۰/۰۸ cm/s و ۰/۰۳۶ lit/s

۲) ۰/۰۸ cm/s و ۰/۰۱۲ lit/s

۳) ۰/۱۲ cm/s و ۰/۰۳۶ lit/s

۴) ۰/۱۲ cm/s و ۰/۰۱۲ lit/s

پاسخ: برای بررسی این تمرین، با توجه به اختلاف هد $\Delta H = 2\,m$ که در کل خاک ایجاد شده است، داریم:

سرعت ظاهری طبق رابطهٔ دارسی : $V = ki = k\,(\frac{\Delta H}{L}) = 0/04 \times (\frac{2}{2}) = 0/04\ cm/s$

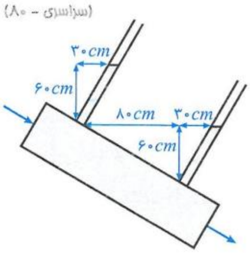
سرعت تراوش (واقعی) : $V_s = \frac{V}{n}\ ,\ n = \frac{e}{1+e} = \frac{0/5}{1+0/5} = \frac{1}{3} \Rightarrow V_s = \frac{0/04}{(\frac{1}{3})} = 0/12\ cm/s$

$$Q = V \times A = 0/04 \times (\frac{\pi \times 20^2}{4}) = 12\ cm^3/s = 0/012\ lit/s$$

بنابراین گزینه (۴) پاسخ صحیح است.

تمرین ۸: داخل لوله‌ای به قطر ۱۰cm، خاکی با ضریب نفوذپذیری $k = 2\ cm/sec$ قرار دارد. باتوجه به ارتفاع آب در فشارسنج‌ها، میـزان دبـی عبوری از لولهٔ محتوی خاک چند cm^3/s است؟

(سراسری - ۸۰)



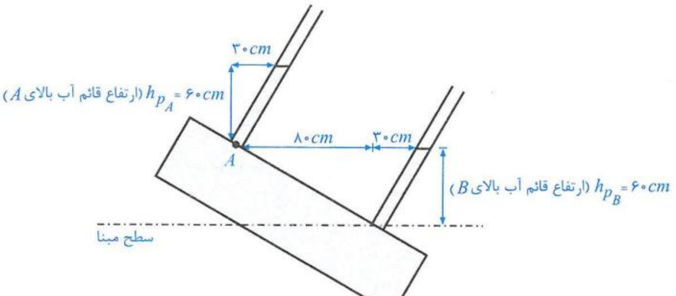
۱) 20π

۲) 30π

۳) 40π

۴) 50π

پاسخ: ابتدا سطح مبنا را در تراز نقطهٔ B در نظر گرفته و اعداد داده شده روی شکل سؤال را معنی می‌کنیم:



$z_A = 60\ cm$ (فاصلهٔ A از سطح مبنا)

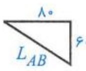
$z_B = 0$ (B روی سطح مبنا)

حال ΔH_{AB} را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta H_{AB} = H_A - H_B = (h_{p_A} + h_{z_A}) - (h_{p_B} + h_{z_B}) = (60+60) - (60+0) = 60\ cm$$

در واقع ΔH به‌دلیل اختلاف z در دو نقطهٔ A و B ایجاد شده است. در ادامه مقدار دبی را از رابطهٔ گفته شده در صفحهٔ قبل می‌یابیم:

$Q = kA\,(\frac{\Delta H_{AB}}{L_{AB}})\ ,\ L_{AB} = \sqrt{60^2 + 80^2} = 100\ cm$

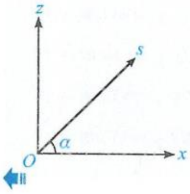


$\Rightarrow Q = 2 \times (\frac{\pi \times 10^2}{4}) \times (\frac{60}{100}) = 30\,\pi\ cm^3/s$

بنابراین گزینهٔ (۲) درست است.

بررسی یک موضوع جالب

از آنجائیکه آرایش ذرات خاک و نحوهٔ قرارگیری آنها در جهت‌های مختلف با هم فرق می‌کند، می‌توان انتظار داشت که نفوذپذیری خـاک نیز در جهات مختلف، متفاوت باشد. به چنین خاکی که در آن ضریب نفوذپذیری در راستاهای مختلف متفاوت است، خاک **ناهمسان** یـا **غیرایزوتروپ** گفته می‌شود.



در یک خاک ناهمسان در حالت دو بعدی، چنانچه ضریب نفوذپذیری در دو راستای عمود بر هم (مثلاً افقی x و قائم z) را داشته باشیم، در آن‌صورت می‌توانیم ضریب نفوذپذیری در راستای دلخواه s را از رابطهٔ زیر محاسبه کنیم:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2\alpha}{k_x} + \frac{\sin^2\alpha}{k_z}$$

در مورد رابطهٔ صفحهٔ قبل باید بگوییم که:

۱) محدودهٔ قابل‌قبول برای α، بین صفر و 90° است که با جایگذاری $\alpha = 0$ و $\alpha = 90^\circ$ در این رابطه خواهیم داشت:

$$\alpha = 0 \Rightarrow \frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2(0)}{k_x} + \frac{\sin^2(0)}{k_z} \Rightarrow k_s = k_x$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow \frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2 90}{k_x} + \frac{\sin^2 90}{k_z} \Rightarrow k_s = k_z$$

۲) اگر خاک همسان (ایزوتروپ) باشد، در آن‌صورت $k_x = k_z = k$ بوده و خواهیم داشت:

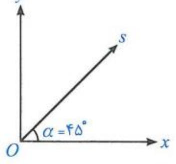
$$\frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2\alpha}{k_x} + \frac{\sin^2\alpha}{k_z} = \frac{1}{k}\underbrace{(\cos^2\alpha + \sin^2\alpha)}_{1} \Rightarrow k_s = k$$

تذکر ۱: معمولاً ضریب نفوذپذیری خاک در امتداد افقی بزرگتر از ضریب نفوذپذیری خاک در امتداد قائم است. علت این موضوع فشردگی خاک در امتداد قائم به علت سنگینی ناشی از وزن خاک‌های بالایی است (معمولاً $k_x > 10 k_z$ می‌باشد.)

تذکر ۲: اگر بخواهیم برای خاک ناهمسان یک نفوذپذیری معادل (یعنی یک نفوذپذیری یکسان در تمام جهات، درست مثل خاک همسان) داشته باشیم، در آن‌صورت این نفوذپذیری معادل از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$k_e = \sqrt{k_x k_z}$$

تمرین ۹: اگر ضریب نفوذپذیری خاک در امتداد محورهای متعامد x و y به‌ترتیب برابر k_x و k_y باشد، ضریب نفوذپذیری در امتداد محور s به زاویهٔ $\alpha = 45^\circ$ با کدام‌یک از مقادیر زیر برابر است؟ (سراسری - ۷۵)



۱) $k_s = \dfrac{k_x + k_y}{k_x - k_y}$

۲) $k_s = \dfrac{2k_x k_y}{k_x + k_y}$

۳) $k_s = \dfrac{4k_x k_y}{k_x + k_y}$

۴) $k_s = \dfrac{k_x k_y}{k_x + k_y} + \dfrac{k_x k_y}{k_x - k_y}$

● حل: با قرار دادن $\alpha = 45^\circ$ در رابطهٔ محاسبهٔ k_s خواهیم داشت:

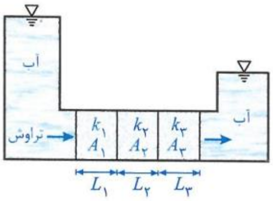
$$\frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2 45}{k_x} + \frac{\sin^2 45}{k_y} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{k_x} + \frac{1}{k_y}\right) = \frac{k_x + k_y}{2k_x k_y} \Rightarrow k_s = \frac{2k_x k_y}{k_x + k_y}$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

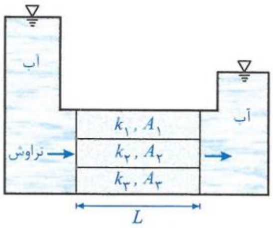
قسمت سوم: تراوش یک بعدی آب در خاک‌های لایه‌بندی شده

در بسیاری از مسائل مربوط به تراوش یک بعدی آب در خاک، با سؤالاتی روبرو هستیم که در هنگام تراوش، آب از چند نوع خاک مختلف عبور می‌کند. این مسائل معمولاً به دو دستهٔ کلی زیر تقسیم می‌شوند:

۱) جریان آب در هنگام تراوش، عمود بر لایه‌های خاک باشد (آرایش سری):



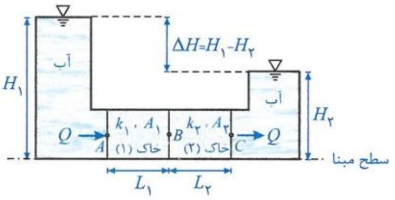
۲) جریان آب در هنگام تراوش، موازی لایه‌های خاک باشد (آرایش موازی):



ما در این قسمت از فصل، مسائلی را که از این دو نوع تراوش مطرح می‌شود بررسی می‌کنیم و در نهایت یک ضریب نفوذپذیری معادل برای **خاک‌های لایه‌بندی شده** (که به آنها **خاک‌های ناهمگن** می‌گوییم) در دو حالت فوق به‌دست می‌آوریم.

C-۱- تراوش آب در امتداد عمود بر لایه‌های خاک

برای شروع، شکل زیر را در نظر بگیرید:



همانطور که مشاهده می‌کنید، در این شکل یک تراوش افقی در امتداد عمود بر سطح لایه‌ها در خاک‌های (۱) و (۲) رخ می‌دهد. ما در ادامهٔ بحث می‌خواهیم با طرح چند سؤال، با شیوهٔ تحلیل این نوع از مسائل آشنا شویم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: هدکل در نقاط A و C چقدر است؟ در این مجموعه در نهایت چقدر افت هد داریم؟

پاسخ: با توجه به اینکه ستون آب سمت چپ مانند یک پیزومتر برای نقطهٔ A عمل می‌کند، می‌توان گفت هدِکل در نقطهٔ A (فاصله سطح آب پیزومتر در نقطهٔ A تا سطح مبنا) برابر H_1 بوده و به طریق مشابه می‌توان نتیجه گرفت که هدِکل در نقطهٔ C نیز برابر H_2 است. افت هدِکل در این مجموعه نیز برابر $\Delta H = H_1 - H_2$ می‌باشد که در اثر حرکت آب در خاک‌های (۱) و (۲) اتفاق افتاده است.

زیر شاخه‌های قسمت سوم

C-۱- تراوش آب در امتداد عمود بر لایه‌های خاک

C-۲- تراوش آب در امتداد موازی لایه‌های خاک

سؤال ۲: اصلی‌ترین رابطه‌ای که در اینگونه مسائل حاکم است، چیست و با کمک این رابطه چگونه می‌توان هدِکل در نقطهٔ B را محاسبه کرد؟

● پاسخ: در اینگونه مسائل اصلی‌ترین رابطه آن است که با توجه به پیوستگی جریان، دبی عبوری از خاک‌های (۱) و (۲) را با هم برابر قرار دهیم که بر این اساس خواهیم داشت:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow k_1 A_1 (\frac{\Delta h_1^*}{L_1}) = k_2 A_2 (\frac{\Delta h_2}{L_2}) \Rightarrow k_1 A_1 (\frac{H_A - H_B}{L_1}) = k_2 A_2 (\frac{H_B - H_C}{L_2})$$

با توجه به اینکه مقادیر k، A و L در هر دو خاک معلوم بوده و مقدار H_C و H_A نیز مشخص است، به‌سادگی می‌توانیم با کمک معادلهٔ درجهٔ اول موجود، H_B را بیابیم.

تذکر ۱: با عبور آب از خاک‌های (۱) و (۲)، آب به اندازه ΔH افت هد خواهد داشت که قسمتی از این افت در خاک (۱) رخ داده (Δh_1) و بقیه در خاک (۲) رخ می‌دهد (Δh_2)، بنابراین می‌توان گفت: $\Delta H = \Delta h_1 + \Delta h_2$

تذکر ۲: با کمک رابطهٔ $\Delta H = \Delta h_1 + \Delta h_2$ و نیز رابطهٔ تساوی دبی‌ها، می‌توانید مقادیر Δh_1 و Δh_2 را بیابید که نتیجهٔ آن در حالت کلی نشان می‌دهد $\Delta h_1 \neq \Delta h_2$ است و طبیعتاً نمی‌توان انتظار داشت که i_1 و i_2 نیز در حالت کلی با هم برابر باشند.

سؤال ۳: به نظر شما در خاک‌های سری، میزان افت هد در یک خاک با چه پارامترهایی متناسب است و چگونه می‌توان با توجه به این موضوع، به‌طور مستقیم مقادیر افت انرژی در هر خاک (Δh_1 و Δh_2 و ...) را به‌دست آورد؟

● پاسخ: به رابطهٔ محاسبهٔ دبی در خاک‌ها توجه کنید:

$$Q = kA(\frac{\Delta h}{L}) \Rightarrow \Delta h = Q\,(\frac{L}{Ak}) \Rightarrow \Delta h \propto \frac{L}{Ak}$$

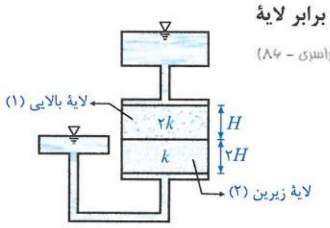
(Q: در خاک‌های لایه‌بندی شده با آرایش سری ثابت است.)

همانطور که ملاحظه می‌کنید، افت هد، متناسب با نسبت $\frac{L}{Ak}$ خاک است و اگر در خاکی این نسبت بزرگ‌تر باشد، افت هد بیشتری در آن رخ می‌دهد. با توجه به این موضوع می‌توان سهم هر خاک از افت هدکل را از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$\Delta h \propto \frac{L}{Ak} \Rightarrow \Delta h_i = \frac{(\frac{L}{Ak})_i}{\sum(\frac{L}{Ak})} \Delta H_{کل}$$

در ادامه با بررسی چند تمرین متنوع، سعی می‌کنیم تا بر روی مفاهیم آموزش داده شده، مسلط‌تر شویم.

تمرین ۱۰: دو لایه خاک در استوانه‌ای با فصل مشترک افقی قرار دارند. لایهٔ زیرین خاک به ضخامت دو برابر لایهٔ بالایی ولی با نفوذپذیری نصف آن مفروض است. درصد افت بار آبی در لایهٔ ضخیم‌تر کدام است؟ (سراسری - ۸۶)



۱) ۲۰٪
۲) ۵۰٪
۳) ۷۵٪
۴) ۸۰٪

● حل: می‌دانیم سهم هر خاک از افت هدکل، در آرایش سری لایه‌ها بستگی به نسبت $\frac{L}{Ak}$ آن خاک دارد، بنابراین می‌نویسیم:

نسبت $\frac{L}{Ak}$:

لایهٔ (۱) $\Rightarrow (\frac{L}{Ak})_1 = \frac{H}{A \times 2k} = \frac{H}{2Ak} \xrightarrow{\text{تعریف می‌کنیم } \frac{H}{2Ak} = x} (\frac{L}{Ak})_1 = x$

لایهٔ (۲) $\Rightarrow (\frac{L}{Ak})_2 = \frac{2H}{A \times k} = 4 \times (\frac{H}{2Ak}) = 4x$

پس سهم لایهٔ ضخیم (لایهٔ پایینی یا همان لایهٔ ۲) از افت هدکل برابر است با:

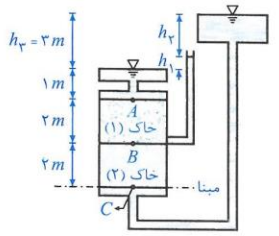
$$\Delta h_2 = (\frac{4x}{x+4x}) \Delta H_{کل} = 0/8\,\Delta H_{کل} \quad \text{یا} \quad 80\%\,\Delta H_{کل}$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

● **دقت:** همانطور که مشاهده کردید، نسبت $\frac{L}{Ak}$ در خاک (۱) را که مقدار کمتری داشت برابر x در نظر گرفتیم و متناسب با آن، این نسبت در خاک (۲) برابر $4x$ شد. این ابتکار ساده سرعت شما را در روند حل مسئله افزایش می‌دهد.

---

* در خاک‌های لایه‌بندی شده، افت هد در هر خاک را با حرف کوچک و به‌صورت Δh نشان می‌دهیم.



تمرین ۱۱: اگر نفوذپذیری خاک (۲) دو برابر نفوذپذیری خاک (۱) باشد، در آن‌صورت:

الف) مقدار هدکل در نقاط A و C چند متر است؟

ب) هر یک از ارتفاع‌های h_1، h_2 و h_3 معرف چیست؟

ج) ارتفاع‌های h_1 و h_2 چند متر می‌باشند؟

د) فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B چند kN/m^2 است؟ (سراسری - ۸۲)

پاسخ

الف) سطح آبِ بالاتر (سمت راست)، معادل با سطح آب پیزومتر در نقطهٔ C می‌باشد و سطح آبِ پایین‌تر (سمت چپ) نیز معادل با سطح آب پیزومتر در نقطهٔ A است، بنابراین می‌توان فاصلهٔ این سطوح از سطح مبنا را هدِکل در نقاط C و A دانست، یعنی:

$H_A = 1 + 2 + 2 = 5\,m \quad , \quad H_C = 3 + 1 + 2 + 2 = 8\,m$

ب) با توجه به اینکه هدکل در نقطهٔ C بیشتر از نقطهٔ A است، می‌توان نتیجه گرفت که جهت جریان از C به سمت A (یا بهتر بگوییم از C به سمت B و بعد به سمت A) می‌باشد. وقتی آب از نقطهٔ C به نقطهٔ B می‌رسد (یعنی خاک (۲) را طی می‌کند)، با توجه به پیزومتر B، تراز پیزومتری به اندازه h_2 افت می‌کند که در واقع همان Δh_2 یا افت هد در خاک (۲) است. در ادامه با حرکت آب از نقطهٔ B به A و پیمودن کل خاک (۱)، تراز پیزومتری به اندازه h_1 افت می‌کند که در واقع همان Δh_1 یا افت هد در خاک (۱) است. h_3 نیز که مجموع h_1 و h_2 است، معرف افت هدِکل یعنی ΔH می‌باشد.

ج) برای یافتن Δh_1 (یا همان h_1) و Δh_2 (یا همان h_2)، مشابه با تمرین قبل خواهیم داشت:

$$\text{نسبت } \frac{L}{Ak} \begin{cases} \text{لایهٔ (۱)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_1 = \frac{2}{Ak} = 2 \times (\frac{1}{Ak}) \xrightarrow{\text{تعریف می‌کنیم } \frac{1}{Ak} = x} (\frac{L}{Ak})_1 = 2x \\ \text{لایهٔ (۲)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_2 = \frac{2}{A \times 2k} = \frac{1}{Ak} = x \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta h_1 = (\frac{2x}{2x + x}) \Delta H_{\text{کل}} = \frac{2}{3} \times 3 = 2\,m \quad , \quad \Delta h_2 = (\frac{x}{2x + x}) \Delta H_{\text{کل}} = \frac{1}{3} \times 3 = 1\,m$$

د) در اینگونه مسائل برای یافتن فشار آب حفره‌ای در یک نقطه، ابتدا هدِکل در آن نقطه را یافته و سپس از رابطهٔ $(H - h_z)$ هد فشار را به‌دست می‌آوریم و با ضرب آن در γ_w، فشار آب حفره‌ای محاسبه می‌شود. برای یافتن H_B، دو دیدگاه زیر وجود دارد:

یافتن هد در نقطهٔ B

دیدگاه اول: هدِکل در نقطهٔ C را که به سادگی در اولِ حل مسئله به‌دست آوردیم در نظر بگیرید. حال اگر میزان افت هد خاک (۲) را از آن کم کنیم، در آن‌صورت H_B به‌سادگی به‌دست می‌آید:

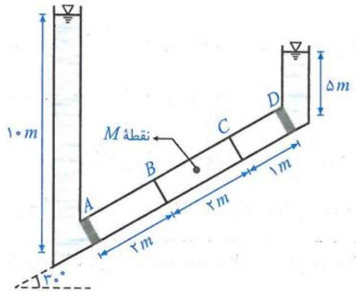
هد نقطهٔ B = هد نقطهٔ C − [افت هد از C تا B] $\Rightarrow H_B = H_C - \Delta h_2 = 8 - 1 = 7\,m$

(افت هد در خاک (۲))

دیدگاه دوم: هد کل در نقطهٔ B، برابر فاصلهٔ سطح آب پیزومتر در نقطهٔ B از سطح مبناست که برابر $7\,m$ می‌باشد $(2 + 1 + 2 + 2)$.

چون در مسائل معمولاً تراز آب پیزومتر در نقاط میانی خاک داده نمی‌شود، استفاده از دیدگاه اول پرکاربردتر است. حال در انتها، فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B را می‌یابیم:

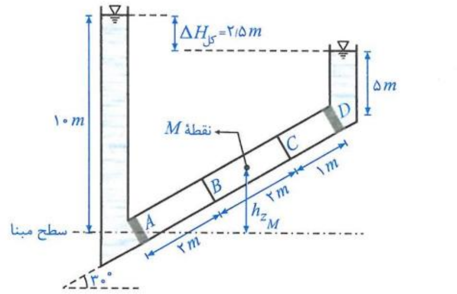
محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای: $u_B = h_{p_B} \times \gamma_w = (H_B - h_{z_B}) \times \gamma_w = (7 - 2) \times 10 = 50\,kN/m^2$



تمرین ۱۲: شکل روبرو را درنظر بگیرید. لایه‌های خاک AB و BC و CD به‌ترتیب دارای ضرایب نفوذپذیری $k_1 = 0.01\,m/s$ و $k_2 = 0.02\,m/s$ و $k_3 = 0.03\,m/s$ هستند. سطح مقطع لوله را یک متر مربع فرض کنید. درصورتیکه فشار آب در نقطهٔ A معادل ۱۰ متر و در D معادل ۵ متر باشد، مقدار فشار معادل ارتفاع آب در نقطهٔ M واقع در وسط خاک BC چقدر است؟ (سراسری - ۷۳)

حل: در این سؤال مقدار h_{p_M} خواسته شده است که با توجه به رابطهٔ $h_{p_M} = H_M - h_{z_M}$ گام‌های زیر را طی می‌کنیم:

گام اول: اگر سطح مبنا را روی A انتخاب کنیم، در آن‌صورت h_{z_M} برابر می‌شود با:



$$h_{z_M} = (AB + BM) \times \sin\alpha = (۲+۱) \times \sin ۳۰^\circ = ۱/۵\ m$$

گام دوم: میزان افت هد در قسمت‌های AB و BM را به‌دست می‌آوریم. توجه کنید که باز هم مثل مسئله‌های قبل، نسبت $\frac{L}{Ak}$ هر لایه‌ای که کمتر بود، برابر x تعریف می‌گردد:

$$\frac{L}{Ak}\ \text{نسبت} \begin{cases} \text{لایهٔ } AB \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{AB} = \frac{۲}{A \times k} = ۶ \times (\frac{۱}{۳Ak}) = ۶x \\ \text{لایهٔ } BM \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{BM} = \frac{۱}{A \times ۲k} = \frac{۳}{۲}(\frac{۱}{۳Ak}) = ۱/۵\,x \\ \text{لایهٔ } MC \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{MC} = \frac{۱}{A \times ۲k} = \frac{۳}{۲}(\frac{۱}{۳Ak}) = ۱/۵\,x \\ \text{لایهٔ } CD \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{CD} = \frac{۱}{A \times ۳k} = \frac{۱}{۳Ak} = x \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta h_{AB} = (\frac{۶x}{۶x + ۱/۵x + ۱/۵x + x})\,\Delta H_{کل} = ۰/۶ \times ۲/۵ = ۱/۵\ m \quad , \quad \Delta h_{BM} = (\frac{۱/۵\,x}{۶x + ۱/۵x + ۱/۵x + x}) \times ۲/۵ = ۰/۳۷۵\ m$$

گام سوم: با توجه به سطح آب در سمت چپ، هدکل در نقطهٔ A برابر $۱۰\,m$ است (فاصلهٔ سطح آب سمت چپ از مبنا)، پس هدکل در نقطهٔ M برابر است با:

$$H_M = H_A - (\text{افت هد از } A \text{ تا } B + \text{افت هد از } B \text{ تا } M) \Rightarrow H_M = ۱۰ - (۱/۵ + ۰/۳۷۵) = ۸/۱۲۵\ m$$

گام چهارم: در نهایت هد فشار در نقطهٔ M برابر خواهد بود با:

$$h_{p_M} = H_M - h_{z_M} = ۸/۱۲۵ - ۱/۵ = ۶/۶۲۵\ m$$

دقت:

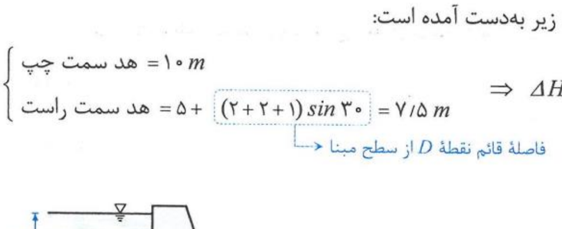
۱- همانطور که مشاهده کردید، چون هد کل در وسط BC را می‌خواستیم، عملاً BM را به‌عنوان یک خاک فرض کرده و MC را نیز به‌عنوان خاک دیگری در نظر گرفتیم.

۲- $\Delta H_{کل}$ که در شکل مقدار آن را برابر $۲/۵\ m$ نشان دادیم، به‌صورت زیر به‌دست آمده است:

$$\begin{cases} \text{هد سمت چپ} = ۱۰\ m \\ \text{هد سمت راست} = ۵ + (۲+۲+۱)\sin ۳۰ = ۷/۵\ m \end{cases} \Rightarrow \Delta H_{کل} = ۱۰ - ۷/۵ = ۲/۵\ m$$

(عبارت $(۲+۲+۱)\sin ۳۰$: فاصلهٔ قائم نقطهٔ D از سطح مبنا)

تمرین ۱۳: در شکل مقابل از میان یک لایهٔ رسی تقریباً نفوذناپذیر، سه لایهٔ ماسه‌ای با ضخامت ۱/۰ متر و نفوذپذیری‌های $۱۰^{-۳}\ cm/s$، $۲ \times ۱۰^{-۳}\ cm/s$ و $۵ \times ۱۰^{-۳}\ cm/s$ به‌ترتیب با طول‌های ۱۵، ۷۵ و ۲۰ متر قرار گرفته است. میزان دبی فرار آب در واحد طول سد چند m^3/s می‌باشد؟ ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^3$)



حل: حرکت آب در خاک‌های ماسه‌ای AB (خاک ۱)، BC (خاک ۲) و CD (خاک ۳) عمود بر امتداد لایه‌هاست، بنابراین افت هدکل برابر مجموع افت هد تک‌تک این لایه‌ها خواهد بود:

$$\Delta H_{کل} = \Delta h_۱ + \Delta h_۲ + \Delta h_۳$$

از طرفی دبی عبوری از کلیه لایه‌ها یکسان بوده و برابر است با:

$$Q = k_۱ A_۱ (\frac{\Delta h_۱}{L_۱}) = k_۲ A_۲ (\frac{\Delta h_۲}{L_۲}) = k_۳ A_۳ (\frac{\Delta h_۳}{L_۳})$$

بنابراین می‌توان نوشت:

$$\Delta H_{کل} = \frac{QL_۱}{A_۱ k_۱} + \frac{QL_۲}{A_۲ k_۲} + \frac{QL_۳}{A_۳ k_۳} = Q[\frac{L_۱}{A_۱ k_۱} + \frac{L_۲}{A_۲ k_۲} + \frac{L_۳}{A_۳ k_۳}]$$

حال با توجه به اینکه $A_۱ = A_۲ = A_۳ = ۱\times۱ = ۱ m^۲$ بوده و $\Delta H_{کل} = H_A - H_D = ۱۵ - ۵ = ۱۰ m$ است، خواهیم داشت:

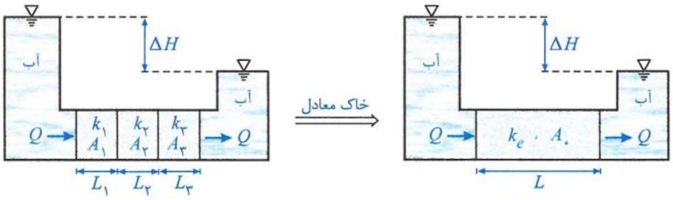
$$۱۰ = Q[\frac{۱۵}{۱\times(۱۰^{-۳}\times۱۰^{-۲})} + \frac{۷۵}{۱\times(۵\times۱۰^{-۳}\times۱۰^{-۲})} + \frac{۲۰}{۱\times(۲\times۱۰^{-۳}\times۱۰^{-۲})}] \Rightarrow Q = ۲/۵\times۱۰^{-۶}\ m^۳/s$$

دقت: به‌عنوان روش دیگر برای محاسبهٔ Q، می‌توان به‌طور مثال $\Delta h_۱$ را با توجه به مفهوم افت هد در خاک‌های سری محاسبه کرد و سپس از رابطهٔ $Q = k_۱ A_۱ \frac{\Delta h_۱}{L_۱}$ کمک گرفت.

توصیه می‌شود که برای تسلط بیشتر، مقادیر Δh_{AB}، Δh_{BC}، Δh_{CD}، H_B، H_C، u_B و u_C را خودتان به‌دست آورید.

محاسبه ضریب نفوذپذیری معادل در آرایش سری لایه‌های خاک

شکل زیر را در نظر بگیرید. فرض کنید می‌خواهیم به‌جای سه خاک قرار گرفته در شکل سمت چپ، یک خاک با ضریب نفوذپذیری k_e، طول L و سطح مقطع $A_\circ$ را جایگزین کنیم به‌گونه‌ای که ضمن ثابت ماندن ΔH، دبی عبوری از شکل (۲) با دبی عبوری از شکل (۱) برابر باشد:



شکل (۱) شکل (۲)

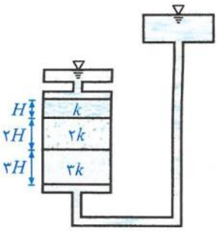
$$Q_{\text{شکل (۱)}} = Q_{\text{شکل (۲)}} \Rightarrow k_۱ A_۱ (\frac{\Delta h_۱}{L_۱}) = k_e A_\circ (\frac{\Delta H}{L}) \Rightarrow \frac{k_۱ A_۱}{L_۱} \times \boxed{\Delta h_۱} = k_e A_\circ (\frac{\Delta H}{L})$$

$$\Delta h_۱ = \frac{(\frac{L_۱}{A_۱ k_۱})}{\Sigma(\frac{L}{Ak})} \times \Delta H$$

$$\Rightarrow k_e = \frac{(\frac{L}{A_\circ})}{\Sigma(\frac{L}{Ak})} \xrightarrow[A_\circ = A_۱ = A_۲ = \cdots]{\text{حالت خاص}} k_e = \frac{L}{\frac{L_۱}{k_۱} + \frac{L_۲}{k_۲} + \cdots}$$

تذکر: در شکل (۱) می‌توانستیم به‌جای $\Delta h_۱$، دبی را برحسب $\Delta h_۲$ و $\Delta h_۳$ نیز بنویسیم که باز هم، همین جواب به‌دست می‌آمد.

تمرین ۱۴: در شکل مقابل ضریب نفوذپذیری معادل خاک کدام است؟



۱) $\frac{۱۸}{۷}k$
۲) $\frac{۱}{۲}k$
۳) $۲k$
۴) $\frac{۳۶}{۱۱}k$

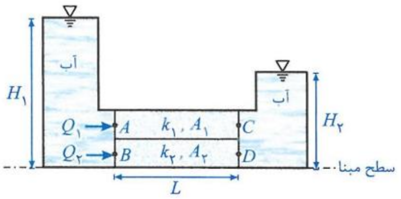
حل:

$$k_e = \frac{L}{\frac{L_۱}{k_۱} + \frac{L_۲}{k_۲} + \frac{L_۳}{k_۳}} = \frac{H + ۲H + ۳H}{\frac{H}{k} + \frac{۲H}{۲k} + \frac{۳H}{۳k}} = \frac{۶H}{۳(\frac{H}{k})} = ۲k$$

بنابراین گزینه (۳) صحیح است.

C-۲- تراوش آب در امتداد موازی لایه‌های خاک

شکل مقابل را در نظر بگیرید:



همانطور که مشاهده می‌کنید در این شکل یک تراوش افقی در امتداد موازی با سطح لایه‌ها در خاک‌های (۱) و (۲) رخ می‌دهد. ما در ادامهٔ بحث می‌خواهیم با طرح چند سؤال، با شیوهٔ تحلیل این نوع از مسائل آشنا شویم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: هدکل در نقاط A، B، C و D چقدر است؟

● پاسخ: همانطور که در بخش قبلی (آرایش سری لایه‌ها) دیدید، ستون‌های آب در دو طرف راست و چپ خاک، در حکم پیزومتر برای نقاط مرتبط با خود می‌باشند. از این‌رو می‌توان فاصله سطح آب در آنها تا سطح مبنا را به‌عنوان هدِکل این نقاط در نظر گرفته و بنویسیم:

$$H_A = H_B = H_1 \quad , \quad H_C = H_D = H_2$$

تذکر: اگر قرار بود هدِکل نقاط A و B با هم برابر نباشد و یا هدِکل نقاط C و D متفاوت باشد، در آن‌صورت جریان در امتداد عمود بر لایه‌ها نیز برقرار می‌شد که این با فرض اولیه ما مبنی بر تراوش موازی با لایه‌ها، مغایرت دارد.

سؤال ۲: افت هد در کدام‌یک از خاک‌های (۱) و (۲) بیشتر است؟

● پاسخ: برای مقایسهٔ افت هد در این دو خاک می‌توان گفت:

$$\begin{cases} \Delta h_1 = H_A - H_C = H_1 - H_2 \\ \Delta h_2 = H_B - H_D = H_1 - H_2 \end{cases} \Rightarrow \Delta h_1 = \Delta h_2 = H_1 - H_2$$

بنابراین افت هد در دو خاک (۱) و (۲) با هم برابر است.

تذکر ۱: با توجه به برابر بودن Δh_1 و Δh_2، در مورد مقایسهٔ گرادیان هیدرولیکی دو خاک (۱) و (۲) می‌توان گفت:

$$\begin{cases} i_1 = \dfrac{\Delta h_1}{L_1} \\ i_2 = \dfrac{\Delta h_2}{L_2} \end{cases} \xrightarrow{L_1 = L_2 = L} i_1 = i_2 \Rightarrow$$

گرادیان هیدرولیکی دو خاک با هم برابر است.

تذکر ۲: سرعت حرکت آب در خاک‌های (۱) و (۲) را می‌توان به‌صورت زیر با هم مقایسه کرد:

$$\begin{cases} V_1 = k_1 i_1 \\ V_2 = k_2 i_2 \end{cases} \xrightarrow{i_1 = i_2} \frac{V_2}{V_1} = \frac{k_2}{k_1}$$

تذکر ۳: با توجه به تراکم‌ناپذیری آب و اصل پیوستگی جریان می‌توان گفت، دبی عبوری از کل خاک برابر مجموع تک‌تک دبی‌های عبوری از هر خاک است و در حالت کلی دبی‌های عبوری از خاک‌ها با هم برابر نیستند: $Q_{کل} = Q_1 + Q_2$

سؤال ۳: به نظر شما میزان دبی عبوری در یک خاک با چه پارامترهایی متناسب است و چگونه می‌توان با توجه به این موضوع، به‌طور مستقیم دبی عبوری از هر خاک (Q_1 و Q_2 و ...) را به‌دست آورد؟

● پاسخ: بیایید دوباره رابطهٔ محاسبهٔ دبی در خاک‌ها را بنویسیم:

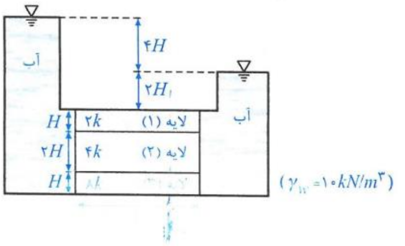
$$Q = kA\left(\frac{\Delta h}{L}\right) = \boxed{\Delta h}\left(\frac{Ak}{L}\right) \Rightarrow Q \propto \frac{Ak}{L}$$

(Δh:) در خاک‌های لایه‌بندی شده با آرایش موازی یکسان است.

همانطور که ملاحظه می‌کنید، دبی عبوری از هر خاک متناسب با نسبت $\frac{Ak}{L}$ خاک است و اگر در خاکی این نسبت بزرگتر باشد، دبی عبوری از آن خاک بیشتر خواهد بود. با توجه به این موضوع می‌توان سهم هر خاک از دبی کل را از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$Q \propto \frac{Ak}{L} \Rightarrow \boxed{Q_i = \frac{\left(\frac{Ak}{L}\right)_i}{\Sigma\left(\frac{Ak}{L}\right)} Q_{کل}}$$

در ادامه با حل چند تمرین متنوع، بر روی مفاهیم گفته شده مسلط‌تر می‌شویم.



تمرین ۱۵: مطابق شکل روبرو، جریان افقی آب از یک خاک ناهمگن عبور می‌کند. اگر بعد عمود بر صفحهٔ لایه‌ها یکسان باشد، با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال:

الف) نسبت $\frac{V_1}{V_2}$ کدام است؟

ب) چند درصد از دبی عبوری، از لایهٔ وسطی (لایهٔ دوم) می‌گذرد؟

ج) فشار آب حفره‌ای در وسط خاک پایینی (لایهٔ سوم) چند kPa است؟

حل

الف) با توجه به یکسان بودن i می‌توان نوشت:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{2k}{4k} = \frac{1}{2}$$

ب) مشابه با روش محاسبهٔ افت هد در هر لایه، می‌نویسیم: (بعد عمود بر صفحه $= B$)

$$\frac{Ak}{L} \text{ نسبت } \begin{cases} \text{لایهٔ (۱)} \Rightarrow (\frac{Ak}{L})_1 = \frac{(H \times B)(2k)}{L} = \frac{2HBk}{L} = x \\ \text{لایهٔ (۲)} \Rightarrow (\frac{Ak}{L})_2 = \frac{(2H \times B)(4k)}{L} = 4 \times (\frac{2HBk}{L}) = 4x \\ \text{لایهٔ (۳)} \Rightarrow (\frac{Ak}{L})_3 = \frac{(H \times B)(8k)}{L} = 4 \times (\frac{2HBk}{L}) = 4x \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_2 = (\frac{4x}{x + 4x + 4x}) Q_{\text{کل}} \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_{\text{کل}}} = \frac{4}{9} = 44\%$$

ج) به‌دلیل خطی بودن تغییرات هد، اگر در وسط لایهٔ سوم یک پیزومتر قرار دهید، سطح آب آن در وسط فاصلهٔ بین سطح آب سمت چپ و سمت راست خواهد ایستاد، بنابراین ارتفاع ستون آب در این پیزومتر براساس یکی از دو استدلال زیر، برابر می‌شود با:

استدلال اول:

$$h_p = \frac{h_{p\,\text{ابتدای خاک}} + h_{p\,\text{انتهای خاک}}}{2} = \frac{(4H + 2H + 3/5H) + (2H + 3/5H)}{2} = 7/5\,H$$

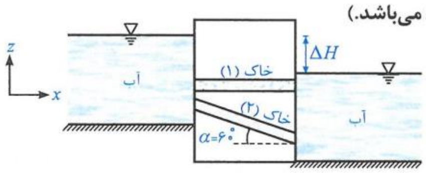
استدلال دوم:

$$h_p = 4H \times \frac{1}{2} + 2H + H + 2H + H \times \frac{1}{2} = 7/5\,H$$

و در نهایت فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ موردنظر برابر خواهد بود با:

$$u = h_p \times \gamma_w = 7/5\,H \times \gamma_w = 7/5\,\gamma_w H$$

تمرین ۱۶: در شکل زیر، دبی عبوری از خاک ماسه‌ای (۱) چند برابر دبی عبوری از خاک ماسه‌ای (۲) می‌باشد؟ (جنس و مساحت خاک‌های ماسه‌ای یکسان بوده و ضریب نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای در امتداد x چهار برابر امتداد z می‌باشد.)



۱) ۱

۲) ۲/۵

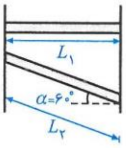
۳) ۳/۵

۴) ۶/۵

حل دبی عبوری از خاک (۱) برابر است با:

$$Q_1 = k_x A (\frac{\Delta H}{L_1}) \xrightarrow{k_x = 4k_z} Q_1 = 4k_z A (\frac{\Delta H}{L_1})$$

برای خاک (۲)، تراوش در یک راستای مایل رخ داده است و برای محاسبهٔ دبی در آن، ابتدا باید ضریب نفوذپذیری در امتداد مایل را به‌دست آوریم. از این‌رو می‌نویسیم:



$$\begin{cases} Q_2 = k_s A (\frac{\Delta H}{L_2}) \\ \frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2\alpha}{k_x} + \frac{\sin^2\alpha}{k_z} \Rightarrow \frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2 60}{4k_z} + \frac{\sin^2 60}{k_z} \Rightarrow k_s = \frac{16}{13} k_z \\ \cos\alpha = \frac{L_1}{L_2} \Rightarrow L_2 = \frac{L_1}{\cos 60} = 2L_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_2 = k_s A (\frac{\Delta H}{L_2}) = \frac{16}{13} k_z A (\frac{\Delta H}{2L_1}) = \frac{8}{13} k_z A (\frac{\Delta H}{L_1})$$

و در نهایت نسبت $\frac{Q_۱}{Q_۲}$ برابر است با:

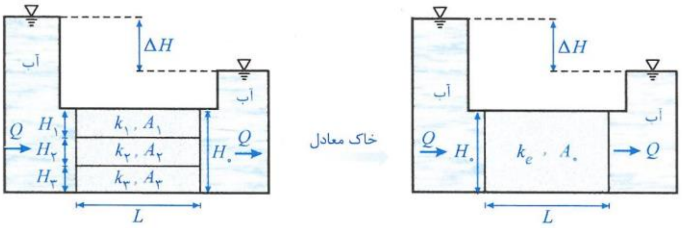
$$\frac{Q_۱}{Q_۲}=\frac{۴k_z\,A\,(\frac{\Delta H}{L_۱})}{\frac{۸}{۱۳}k_z\,A\,(\frac{\Delta H}{L_۱})}=\frac{۱۳}{۲}=۶/۵$$

پس گزینه (۴) صحیح است.

- **دقت:** در هر دو خاک افت هد برابر ΔH است.

محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری معادل در آرایش موازی لایه‌های خاک

شکل زیر را در نظر بگیرید. فرض کنید می‌خواهیم به‌جای سه خاک نشان داده شده، یک خاک با ضریب نفوذپذیری k_e، طول L و سطح مقطع $A_۰$ را جایگزین کنیم به‌گونه‌ای که ضمن ثابت ماندن ΔH، دبی عبوری از شکل (۲) با دبی عبوری از شکل (۱) مساوی شود:



شکل (۱)   شکل (۲)

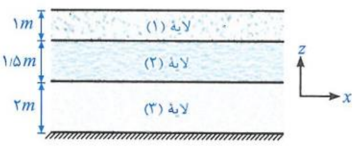
$$Q_{\text{شکل (۱)}}=Q_{\text{شکل (۲)}}\Rightarrow Q_۱+Q_۲+Q_۳=Q_{\text{کل}}\Rightarrow k_۱A_۱(\frac{\Delta h_۱}{L_۱})+k_۲A_۲(\frac{\Delta h_۲}{L_۲})+k_۳A_۳(\frac{\Delta h_۳}{L_۳})=k_eA_۰(\frac{\Delta H}{L})$$

$$\xrightarrow[L_۱=L_۲=L_۳=L]{\Delta h_۱=\Delta h_۲=\Delta h_۳=\Delta H} k_۱A_۱+k_۲A_۲+k_۳A_۳=k_eA_۰\Rightarrow k_e=\frac{k_۱A_۱+k_۲A_۲+k_۳A_۳}{A_۰}\Rightarrow k_e=\frac{\sum(kA)_i}{\sum A_i}$$

$$\xrightarrow[\text{بعد عمود بر صفحهٔ واحد}]{\text{حالت خاص}} k_e=\frac{k_۱H_۱+k_۲H_۲+k_۳H_۳}{H_۱+H_۲+H_۳}\Rightarrow k_e=\frac{\sum(kH)_i}{\sum H_i}$$

در ادامه برای درک بهتر و نیز مرور مطالب گذشته در مورد ضریب نفوذپذیری معادل، به تمرین زیر توجه کنید:

تمرین ۱۷: در شکل مقابل ضریب نفوذپذیری لایه‌های (۱)، (۲) و (۳) در جهت افقی (x) به‌ترتیب برابر ۲، ۱ و mm/s ۰/۵ بوده و ضریب نفوذپذیری در هر سه لایه، در امتداد قائم (z)، نصف ضریب نفوذپذیری آنها در امتداد افق می‌باشد. نسبت نفوذپذیری معادل در امتداد x به z چقدر است؟ (بعد عمود بر صفحه را واحد فرض کنید.)



- پاسخ:

$$k_{x(e)}=\frac{\sum(k_xH)_i}{\sum H_i}=\frac{۲\times۱+۱\times۱/۵+۰/۵\times۲}{۱+۱/۵+۲}=۱\,mm/s$$

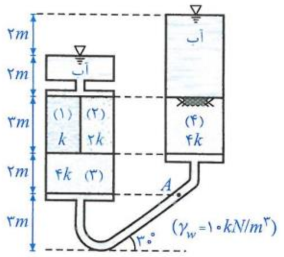
$$k_{z(e)}=\frac{\sum H_i}{\sum(\frac{H}{k_z})_i}=\frac{۱+۱/۵+۲}{\frac{۱}{۱}+\frac{۱/۵}{۰/۵}+\frac{۲}{۰/۲۵}}=\frac{۴/۵}{۱۲}=\frac{۳}{۸}\,mm/s$$

$$\frac{k_x(e)}{k_z(e)}=\frac{۱}{(\frac{۳}{۸})}=\frac{۸}{۳}=۲/۶۷$$

بررسی یک مسئله ترکیبی از تراوش آب در خاک

در این قسمت به‌طور کامل با آرایش سری و موازی لایه‌های خاک آشنا شدیم. در پایان می‌خواهیم با یک سؤال ترکیبی و نسبتاً دشوار، تمام مطالب این قسمت را با هم مرور کنیم.

تمرین ۱۸: شکل زیر دو ظرف استوانه‌ای را نشان می‌دهد که محتوی خاک‌های (۱)، (۲)، (۳) و (۴) بوده و توسط یک لولهٔ مایل به هم متصل شده‌اند. قطر خاک (۴) برابر $۲۰ cm$ است و مساحت مقطع آن با خاک‌های (۱) و (۲) برابر بوده و نصف مساحت مقطع خاک (۳) است. با توجه به اطلاعات داده شده روی شکل، موارد زیر را بیابید: $(k = ۱۰^{-۳}\ cm/sec)$



الف) افت هد در هر یک از خاک‌ها چند متر است؟

ب) فشار آب در نقطهٔ A چند $kN/m^۲$ است؟

ج) گرادیان هیدرولیکی در کدام خاک از بقیه بیشتر است؟

د) دبی کل عبوری از مجموعه چند lit/s است؟

هـ) نسبت دبی عبوری از خاک (۲) به دبی عبوری از خاک (۱) کدام است؟

و) چه رابطه‌ای بین سرعت حرکت آب در خاک‌های (۱)، (۲) و (۳) برقرار است؟

حل:

الف) خاک‌های (۱) و (۲) با آرایش موازی در کنار هم قرار گرفته‌اند و با خاک‌های (۳) و (۴) سری هستند، پس می‌توان گفت افت هد خاک‌های (۱) و (۲) با هم برابر است ولی با افت هد خاک‌های (۳) و (۴) متفاوت است.

برای محاسبه افت هد در هر خاک ابتدا بایستی خاک معادل (۱ و ۲) را مشخص کنیم تا در نهایت سه خاک با آرایش سری داشته باشیم.

$$k_{e(۱,۲)} = \frac{k_۱ A_۱ + k_۲ A_۲}{A_۱ + A_۲} = \frac{k \times \frac{A}{۲} + ۲k \times \frac{A}{۲}}{\frac{A}{۲} + \frac{A}{۲}} = ۱/۵\, k$$

پس خاک معادل (۲ و ۱) دارای ضریب نفوذپذیری معادل $۱/۵\,k$، مساحت A و طول $۳\,m$ می‌باشد. در ادامه، مشابه با تمرین‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲، مقادیر افت هد در هر لایه را می‌یابیم:

نسبت $\frac{L}{Ak}$:

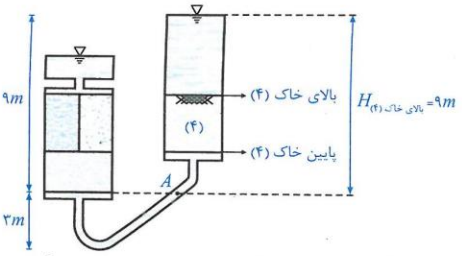
$$\text{لایهٔ معادل (۱ و ۲)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{۱,۲} = \frac{۳}{A \times ۱/۵\,k} = ۴ \times (\frac{۱}{۲Ak}) = ۴x$$

$$\text{لایهٔ (۳)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_۳ = \frac{۲}{A \times ۴k} = \frac{۱}{۲Ak} = x$$

$$\text{لایهٔ (۴)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_۴ = \frac{۳}{\frac{A}{۲} \times ۴k} = ۳ \times (\frac{۱}{۲Ak}) = ۳x$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \Delta h_۱ = \Delta h_۲ = (\frac{۴x}{۴x + x + ۳x})\Delta H_{کل} = \frac{۱}{۲} \times ۲ = ۱\, m \\ \Delta h_۳ = (\frac{x}{۴x + x + ۳x})\Delta H_{کل} = \frac{۱}{۸} \times ۲ = ۰/۲۵\, m \\ \Delta h_۴ = (\frac{۳x}{۴x + x + ۳x})\Delta H_{کل} = \frac{۳}{۸} \times ۲ = ۰/۷۵\, m \end{cases}$$

ب) در لولهٔ مایل خاکی وجود ندارد و در نتیجه افت هد هم نداریم، پس هد کلیه نقاط آن با هم برابر است. برای محاسبهٔ فشار آب در نقطهٔ A به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:



- ابتدا هد قسمت پایین لایهٔ (۴) را که با هد نقطهٔ A برابر است می‌یابیم. توجه کنید که برای راحتی کار، سطح مبنا را روی نقطهٔ A انتخاب می‌کنیم:

$$\Delta h_۴ = H_{بالای لایه} - H_{پایین لایه} \Rightarrow ۰/۷۵ = ۹ - H_{پایین لایه}$$

$$\Rightarrow H_{پایین لایه} = ۸/۲۵\, m$$

$$H_A = H_{پایین لایهٔ (۴)} = ۸/۲۵\, m$$

- سپس با توجه به سطح مبنای انتخاب شده و با استفاده از روابط خوانده شدهٔ قبلی، فشار آب در نقطهٔ A را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$P_A = h_{p_A} \times \gamma_w = (H_A - h_{z_A}) \times \gamma_w = (۸/۲۵ - ۰) \times ۱۰ = ۸۲/۵\, kN/m^۲$$

ج)

$$i_۱ = i_۲ = \frac{\Delta h_{۱,۲}}{L_{۱,۲}} = \frac{۱}{۳} = ۰/۳۳ \ , \ i_۳ = \frac{\Delta h_۳}{L_۳} = \frac{۰/۲۵}{۲} = ۰/۱۲۵ \ , \ i_۴ = \frac{\Delta h_۴}{L_۴} = \frac{۰/۷۵}{۳} = ۰/۲۵ \Rightarrow i_۱ = i_۲ > i_۴ > i_۳$$

د) خاک‌های (۳)، (۴) و خاک معادل (۱ و ۲) با هم سری بوده و دبی عبوری از آنها با هم برابر است که البته همان دبی کل است. ما برای محاسبهٔ دبی کل می‌توانیم هر کدام از این خاک‌ها را ملاک قرار دهیم که البته در این سؤال، خاک (۴) مناسبتر است. پس می‌نویسیم:

$$Q_{کل} = k_۴ i_۴ A_۴ = (۴\times ۱۰^{-۳})(۰/۲۵)(\frac{\pi \times ۲۰^۲}{۴}) = ۰/۱\,\pi\ cm^۳/s = ۳/۱۴\times ۱۰^{-۴}\ lit/s$$

ه) دبی عبوری از خاک‌های (۱) و (۲) به‌نسبت $\frac{Ak}{L}$ این خاک‌ها، بین‌شان تقسیم می‌شود، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{Q_۲}{Q_۱} = \frac{(\frac{Ak}{L})_۲}{(\frac{Ak}{L})_۱} \xrightarrow[L_۱ = L_۲]{A_۱ = A_۲} \frac{Q_۲}{Q_۱} = \frac{k_۲}{k_۱} = \frac{۲k}{k} = ۲$$

و) خاک‌های (۱) و (۲) موازی هستند، پس می‌نویسیم:

$$V = k\ \underbrace{i}_{ثابت} \Rightarrow \frac{V_۲}{V_۱} = \frac{k_۲}{k_۱} = \frac{۲k}{k} = ۲ \Rightarrow V_۲ = ۲V_۱$$

از طرفی با توجه به سری بودن این دو خاک با خاک (۳) می‌توان نتیجه گرفت که مجموع دبی‌های عبوری از این دو خاک با دبی عبوری از خاک (۳) برابر است:

$$Q_۱ + Q_۲ = Q_۳ \Rightarrow V_۱ A_۱ + V_۲ A_۲ = V_۳ A_۳ \Rightarrow V_۱ \times \frac{A}{۲} + ۲V_۱ \times \frac{A}{۲} = V_۳ \times A \Rightarrow V_۱ = \frac{۲}{۳} V_۳$$

پس در نهایت می‌توان گفت:

$$V_۱ = \frac{۱}{۲} V_۲ = \frac{۲}{۳} V_۳$$

D-۱- مفاهیم اولیهٔ تراوش دو بعدی

در قسمت‌های قبل، با حرکت یک بعدی آب در خاک آشنا شدیم و دیدیم که وقتی یک ذرهٔ آب از انرژی بیشتر به سمت انرژی کمتر می‌رفت، مسیرش یک خط مستقیم بود. در این قسمت می‌خواهیم حرکت دو بعدی آب در خاک را به شما معرفی کنیم. در این حالت مسیر حرکت ذرهٔ آب برای رسیدن از انرژی بیشتر (بالا دست) به انرژی کمتر (پایین‌دست)، دیگر به‌صورت یک خط مستقیم نیست.

در مکانیک سیالات می‌خوانیم که برای جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر مثل آب، فرم دیفرانسیلی معادله پیوستگی جریان در حالت دو بعدی به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_z}{\partial z}=0$$

توجه کنید که در رابطهٔ فوق، V_x و V_z به‌ترتیب مؤلفه‌های سرعت در امتداد افقی و قائم می‌باشند و این رابطه نشان می‌دهد که تغییرات سرعت در امتداد x توسط تغییرات سرعت در امتداد z خنثی می‌گردد.

حال اگر یک خاک همگن داشته باشیم، با کمک قانون دارسی، معادلهٔ پیوستگی جریان به فرم زیر در می‌آید*:

$$k_x\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}+k_z\frac{\partial^2 H}{\partial z^2}=0 \xrightarrow[k_x=k_z]{\text{خاک همسان}} \boxed{\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H}{\partial z^2}=0}$$

معادله فوق که به **معادلهٔ لاپلاس** معروف است، نحوه تغییرات هدکل (H) را در حالت دو بعدی نشان می‌دهد.

تمرین ۱۹: با کمک معادلهٔ لاپلاس ثابت کنید که در تراوش یک‌بعدی (مثلاً در راستای x)، تغییرات هدِکل به‌صورت خطی است.

پاسخ

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}+\underbrace{\frac{\partial^2 H}{\partial z^2}}_{\text{(یک بعدی) صفر}}=0 \Rightarrow \frac{\partial H}{\partial x}=a \Rightarrow H=ax+b$$

توجه کنید که در رابطهٔ نهایی به‌دست آمده، a و b اعداد ثابتی هستند و این یعنی، تغییرات هدِ کل خطی است.

حل معادلهٔ لاپلاس و رسم شبکهٔ جریان

حل دقیق معادلهٔ لاپلاس را در درس ریاضیات مهندسی در دورهٔ کارشناسی ارشد خواهید خواند ولی اکنون این سؤال مطرح است که برای تحلیل مسائل دو بعدی تراوش در مکانیک خاک چه باید کرد؟ در پاسخ باید بگوییم که در مکانیک خاک برای حل این معادله از روش‌های ترسیمی استفاده می‌شود که این موضوع با رسم **شبکهٔ جریان** برای خاک همراه است. به‌عبارت دیگر حل ترسیمی معادلهٔ لاپلاس، منجر به ترسیم شبکهٔ جریان می‌شود.

---

* برای این منظور کافی است تا در معادله پیوستگی جریان، V_x و V_z را به‌صورت زیر جایگذاری کنید:

$V_x=-k_x\frac{\partial H}{\partial x}$ ، $V_z=-k_z\frac{\partial H}{\partial z}$

قسمت چهارم: حرکت دو بعدی آب در خاک (شبکهٔ جریان)

زیر شاخه‌های قسمت چهارم

D-۱- مفاهیم اولیهٔ تراوش دو بعدی

D-۲- بررسی قواعد ترسیم شبکهٔ جریان

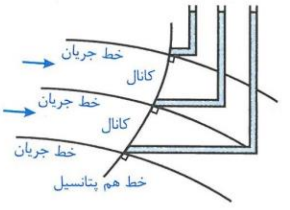
D-۳- ترسیم شبکه جریان در زیر یک سپر فلزی

D-۴- کاربرد شبکهٔ جریان

در مورد شبکهٔ جریان لازم است تا به نکات زیر توجه کنید:

۱) در شبکهٔ جریان، در نهایت به دو دسته منحنی عمود بر هم می‌رسیم که منحنی‌های **خطوط جریان** و منحنی‌های **خطوط هم پتانسیل** نام دارند.

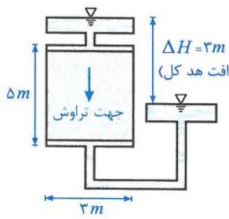
۲) یک خط جریان مسیر تقریبی حرکت یک ذرهٔ آب را نشان می‌دهد وقتی که این ذره از هد بیشتر (بالا دست) به سمت هد کمتر (پایین‌دست) حرکت می‌کند.



۳) یک خط هم پتانسیل (که بر خطوط جریان عمود است) نشان‌دهندهٔ نقاطی است که همگی دارای هدِکل مساوی با یکدیگرند، بنابراین اگر بر روی نقاط مختلف یک خط هم پتانسیل، پیزومتر نصب کنیم، در همهٔ پیزومترها آب به یک اندازه بالا می‌آید.

۴) با توجه به شکل سادهٔ فوق، می‌توان گفت دو خط جریان متوالی یک **کانال جریان** درست می‌کنند. در این شرایط همواره تعداد کانال‌های جریان، یکی از تعداد خطوط جریان کمتر است (در شکل فوق برای سه خط جریان، دو کانال عبور جریان داریم.)

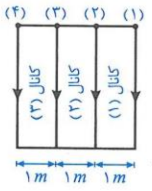
D-۲- بررسی قواعد ترسیم شبکهٔ جریان



در این بخش ابتدا نحوهٔ ترسیم شبکهٔ جریان را در حالت تراوش یک بعدی بیان کرده و شما را با قوانین آن آشنا می‌کنیم و سپس این قوانین را به حالت تراوش دو بعدی تعمیم می‌دهیم. برای شروع، شکل مقابل را در نظر بگیرید که در آن بعد عمود بر صفحه برابر واحد بوده و همانطور که ملاحظه می‌کنید، جهت حرکت آب در خاک از بالا به سمت پایین است.

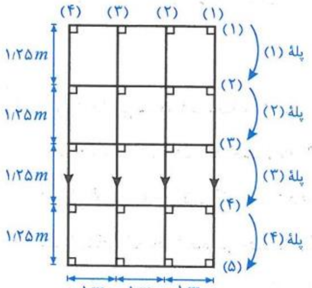
اصولاً برای ترسیم شبکهٔ جریان، سه قانون اصلی وجود دارد که باید رعایت شوند. این قوانین به شرح زیر است:

قانون اول: خطوط جریان باید به فاصلهٔ یکسانی از هم قرار گیرند، به‌طوری که دبی عبوری از کانال‌های ایجاد شده با هم برابر باشد.



در شکل مورد نظر ما اگر خاک را در راستای طولی به سه قسمت مساوی تقسیم کنیم (سه تا یک متر)، در آن‌صورت سه کانال با عرض یکسان ($۱m$) خواهیم داشت که دبی عبوری از آنها با هم برابر می‌شود. توجه کنید که جداره‌های جانبی خاک نیز، خود خط جریان به حساب می‌آیند، (شمارهٔ ۱ و ۴) زیرا در امتداد عمود بر آن جریانی نداریم. پس می‌توان گفت در مجموع ۴ خط جریان و ۳ = ۱ - ۴ کانال برای عبور جریان داریم.

قانون دوم: خطوط هم پتانسیل باید با فاصلهٔ یکسانی از هم قرار گیرند، به‌طوری‌که اختلاف هدِ بین خطوط متوالی با هم برابر باشد.



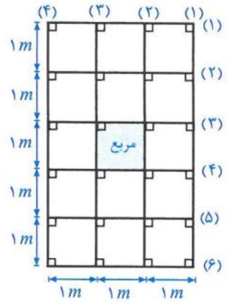
در شکل مورد‌نظر ما اگر خاک را در راستای ارتفاعش به چهار قسمت تقسیم کنیم (چهار تا ۱/۲۵ متر) و خطوط هم پتانسیل را مطابق شکل با فاصلهٔ یکسان ۱/۲۵ متر از هم قرار دهیم، در آن‌صورت چهار پلهٔ افت هدِ یکسان ($\frac{۳}{۴}m$) خواهیم داشت.

هد نقاط روی خط (۲) - هد نقاط روی خط (۱) = اختلاف هد بین هر دو خط هم‌پتانسیل (افت هد در هر پله)

$= $ هد نقاط روی خط (۲) - هد نقاط روی خط (۳) $= \dots = \frac{\Delta H_{کل}}{n} = \frac{۳}{۴}m$

n ← تعداد پله‌های افت

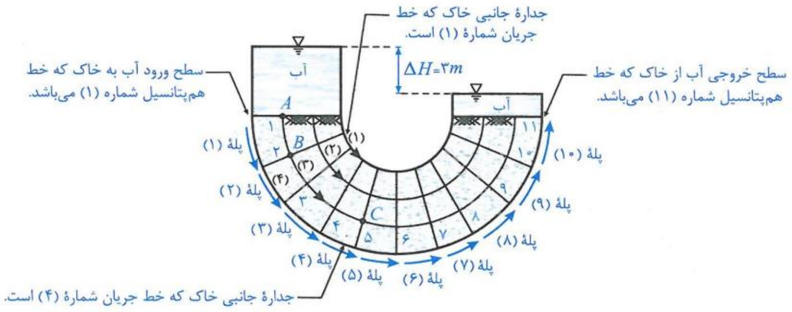
توجه کنید که سطح ورود آب به خاک و همچنین سطح خروج آب از خاک، خود خطوط هم پتانسیل هستند (شمارهٔ ۱ و ۵) زیرا هدِکل روی تمامی نقاط هر یک از آنها یکسان است. ما در این شکل در مجموع ۵ خط هم پتانسیل و ۴ = ۱ − ۵ پلهٔ افت هد داریم.



قانون سوم: خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل به‌گونه‌ای رسم شوند که سلول‌های ایجاد شده توسط آنها حتی‌الامکان به‌صورت مربعی باشند. در شکل ترسیم شده در بالا، سلول‌های ایجاد شده مستطیلی ($1/25\ m \times 1\ m$) هستند، بنابراین لازم است تا اصلاحاتی انجام شود، به این صورت که خاک را در راستای عرضی به پنج قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم تا با ۶ خط هم پتانسیل، پنج پله با افت یکسان ($\frac{\Delta H_{کل}}{n} = \frac{3}{5}\ m$) داشته باشیم و در ضمن سلول‌ها نیز مربعی (به ضلع $1\ m$) شوند.

تذکر: همانطورکه در ابتدا نیز گفته شد، خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل بر هم عمود می‌باشند که این موضوع نیز در ترسیم شبکهٔ جریان رعایت می‌گردد. در ضمن خطوط جریان یکدیگر را قطع نمی‌کنند، همانطور که خطوط هم پتانسیل با یکدیگر برخورد ندارند.

حال در ادامهٔ بحث فرض می‌کنیم که خاک مورد نظرِ ما به‌صورت زیر خم شده است. در آن‌صورت خطوط جریان (و در بعضی مواقع خطوط هم پتانسیل) نیز خم می‌شوند و به شکل منحنی خواهند بود. در این شرایط انحنای خطوط جریان خود نشان‌دهندهٔ یک بعدی نبودن تراوش است:



در مورد شکل فوق که یک تراوش دو بعدی را نشان می‌دهد، می‌توان گفت:

۱) شبکه جریان ترسیم شده، دارای ۴ خط جریان، ۳ کانال، ۱۱ خط هم پتانسیل و ۱۰ پلهٔ افت هد می‌باشد (که در شکل نشان داده شده است).

۲) مقدار افت هد در هر پله برابر است با افت هدِکل تقسیم بر تعداد پله‌های افت هد، پس:

$$\Delta h = \frac{\Delta H}{\text{تعداد پله‌های افت}} = \frac{3}{10} = 0/3\ m$$

۳) اگر از ما بپرسند هد نقطهٔ B نسبت به هد نقطهٔ A چقدر کمتر است، در جواب می‌گوییم با توجه به اینکه از یک پلهٔ افت عبور کرده‌ایم، هد B به اندازهٔ یک پلهٔ افت ($0/3\ m$) از هد A کمتر است. به‌همین ترتیب می‌توان گفت که اگر از ۴ پلهٔ افت عبور کرده باشیم (مثلاً ذرهٔ آب از A تا C حرکت کرده باشد)، افت هد به اندازهٔ $4 \times 0/3 = 1/2\ m$ خواهد بود.

۴) سلول‌های ایجاد شده در حالت تراوش دو بعدی به‌جای مربع به شکل مربع‌های منحنی‌الاضلاع هستند. مربع منحنی‌الاضلاع مربعی است که بتوانیم درون آن طوری یک دایره را محاط کنیم که بر هر یک از اضلاع مربع مماس شود.

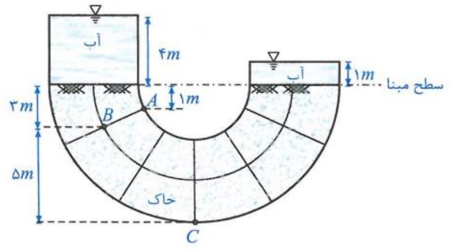
تمرین ۴۰: شکل زیر یک شبکه جریان را نشان می‌دهد که در حالت تراوش دو بعدی ترسیم شده است. با توجه به اطلاعات داده شده، مطلوب است تعیین: ($\gamma_w = ۱۰\, kN/m^۳$)

الف) تعداد خطوط جریان، خطوط هم پتانسیل، کانال‌ها و افت‌های هد

ب) میزان افت هد در هر پلهٔ افت

ج) هدکل در نقاط A، B و C

د) فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B



پاسخ

الف) در شبکهٔ جریان ترسیم شده، ۳ خط جریان معادل با ۲ کانال (۳ − ۱ = ۲) و ۷ خط هم پتانسیل معادل با ۶ پلهٔ افت هد (۷ − ۱ = ۶) مشاهده می‌شود.

ب)

$$\Delta h = \frac{\Delta H}{\text{تعداد پلهٔ افت}} = \frac{۴-۱}{۶} = ۰/۵\, m$$: میزان افت هد در هر پله

ج) با توجه به سطح مبنای داده شده، هدِکل در سطح ورودی آب به خاک برابر ۴ متر است، زیرا ستون آبِ سمت چپ در حکم پیزومتر برای نقاط واقع بر این سطح می‌باشد. از سوی دیگر با عبور از هر پله، به اندازه $\Delta h = ۰/۵\, m$ از هدِکل در سمت چپ کم می‌شود. بنابراین می‌توان هدکل نقاط خواسته شده را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

(از یک پلهٔ افت هد عبور کرده‌ایم)

$$\begin{cases} H_A = H_B = ۴ - \boxed{۱} \times ۰/۵ = ۳/۵\, m \\ H_C = ۴ - \boxed{۳} \times ۰/۵ = ۲/۵\, m \end{cases}$$

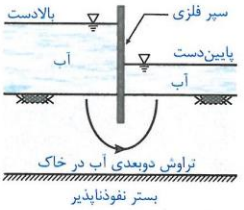
(از سه پلهٔ افت هد عبور کرده‌ایم)

د) ابتدا باید دقت شود که با توجه به سطح مبنای داده شده در صورت سؤال، h_z کلیه نقاط داخل خاک منفی می‌باشد که بایستی این موضوع را به‌هنگام محاسبه فشار آب حفره‌ای مدنظر داشته باشیم. در ادامه محاسبه فشار آب حفره‌ای در B به‌صورت زیر است:

$$u_B = \gamma_w \times h_{p_B} = \gamma_w \times (H_B - h_{z_B}) = ۱۰ \times (۳/۵ + ۳) = ۶۵\, kPa$$

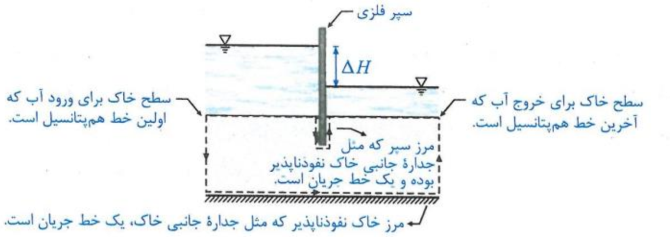
D-۳- ترسیم شبکهٔ جریان در زیر یک سپر فلزی

سپرهای فلزی از جمله سازه‌های نسبتاً کم هزینه هستند که برای مهار آب از آنها استفاده می‌شود و کاربرد زیادی دارند. در شکل زیر یک سپر فلزی کوبیده شده در خاک را ملاحظه می‌کنید که به‌دلیل نفوذپذیر بودن خاک، در زیر آن تراوش دو بعدی رخ داده است:

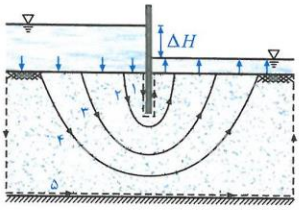


ما در این بخش می‌خواهیم با کمک گرفتن از مطالبی که در بخش قبل ($D-۲$) یاد گرفتیم، برای یک سپر فلزی، شبکهٔ جریان رسم کنیم. برای این منظور به‌ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

۱) ابتدایی‌ترین خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل را مطابق شکل زیر رسم می‌کنیم:



۲ پس از مشخص شدن مرزها و چارچوب شبکهٔ جریان، حالا طوری خطوط جریان را ترسیم می‌کنیم که عرض کانال‌های ایجاد شده تقریباً با هم مساوی باشد.



در شکل بالا علاوه بر خطوط جریان ابتدایی (۱) و (۵)، سایر خطوط فلش‌دار که آنها را با اعداد (۲)، (۳) و (۴) نشان داده‌ایم نیز خطوط جریان بوده و مسیر تقریبی ذرات آب در حرکت از بالادست به سمت پایین‌دست را نشان می‌دهند.

در این شکل تعداد کانال‌های جریان که آن را با N_f (**Number of flow channels**) نشان می‌دهیم، برابر است با:

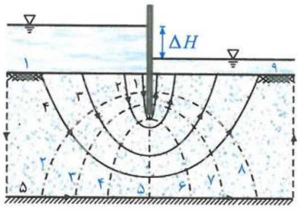
N_f = یک − تعداد خطوط جریان = ۵−۱ = ۴

۳ در انتها خطوط هم پتانسیل را طوری رسم می‌کنیم که:

الف) فاصلهٔ یکسانی از هم داشته باشند.

ب) عمود بر خطوط جریان باشند.

ج) سلول‌هایی که درست می‌شوند، حتی‌الامکان مربع منحنی‌الاضلاع باشند.



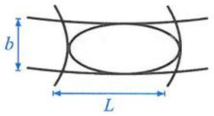
در شکل بالا، علاوه بر خطوط هم پتانسیل ابتدایی (۱) و (۹)، سایر خطوطی که آنها را با شماره‌های (۲) تا (۸) نشان داده‌ایم نیز خطوط هم پتانسیل می‌باشند و هدِکل نقاط قرار گرفته روی هر یک از این خطوط با هم برابر است.

در این شکل تعداد افت‌های هد که آن را با N_d (**Number of head drops**) نشان می‌دهیم، برابر است با:

N_d = یک − تعداد خطوط هم پتانسیل = ۹−۱ = ۸

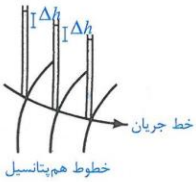
حالا که با ترسیم شبکهٔ جریان در زیر سپر آشنا شدید، در ادامه با ذکر چند نکتهٔ تکمیلی این بخش را به پایان می‌بریم:

۱ علاوه بر خاک زیر سپر، شما می‌توانید شبکهٔ جریان را برای خاک زیر سد بتنی، خاک داخل سدهای خاکی و حتی خاک پشت دیوار حائل نیز رسم کرده و قواعد گفته شده را در مورد آنها نیز به‌کار ببرید.



۲ در برخی مسائل، نقاطی از شبکهٔ جریان وجود دارند که در آنها مربع‌های منحنی‌الاضلاع درست نمی‌شود. در این نقاط که معمولاً در مجاورت مرزهای نفوذناپذیر (مثل سپر یا سنگ بستر و ...) به‌وجود می‌آیند، به ناچار از مستطیل‌های منحنی‌الاضلاع استفاده می‌شود.

۳ افت هد بین دو خط هم پتانسیل متوالی، مقدار ثابت و مشخصی است. به‌عبارت دیگر وقتی با یک خط جریان همراه می‌شویم و از خطوط هم پتانسیل می‌گذریم، افت هد بین دو خط هم‌پتانسیل مقدار ثابتی دارد. با توجه به این موضوع، اگر افت هدکل بین بالادست (سطح آب بالاتر) و پایین‌دست (سطح آب پایین‌تر) را با ΔH نشان دهیم، در آن‌صورت افت هد بین دو خط هم‌پتانسیل متوالی (Δh) برابر است با:



$$\Delta h = \frac{\Delta H}{N_d}$$

۴ نسبت $(\frac{N_f}{N_d})$ در یک شبکهٔ جریان را **فاکتور شکل** می‌نامیم.

۵ ترسیم شبکهٔ جریان مثل رسم یک نقاشی است که قواعد مخصوص به‌خود را دارد. به‌همین دلیل عواملی مثل اختلاف هدِکل (ΔH) یا نفوذپذیری خاک (k) در رسم این نقاشی تأثیر ندارند و مثل آن است که کاغذ نقاشی را عوض کرده باشیم. در عوض چارچوب نقاشی که همان حدود مرزی و هندسهٔ شکل سؤال است (مثل بستر نفوذناپذیر یا عمق فرورفتهٔ سپر در خاک) در رسم نقاشی ما مهم بوده و در ترسیم شبکه جریان تأثیرگذار است.

تمرین ۴۱: کدام‌یک از موارد زیر در ترسیم شبکهٔ جریان برای یک سپر کوبیده شده در خاک تأثیر دارد؟ (سراسری - ۸۴)

۱) میزان نفوذپذیری خاک ۲) اختلاف ارتفاع آب دو طرف سپر (بار آبی)

۳) مورب بودن لایهٔ سنگی نفوذناپذیر کم‌عمق، در زیر خاک موردنظر ۴) هر سه مورد

پاسخ: با توجه به توضیحات داده شده، گزینه (۳) پاسخ صحیح این تست است.

D-۴- کاربرد شبکهٔ جریان

در بخش‌های قبلی این قسمت به‌طور کامل با ترسیم شبکهٔ جریان و قواعد آن آشنا شدیم. همانطور که ملاحظه شد، افت هد بین خطوط هم پتانسیل متوالی، یکسان بوده و از حاصل تقسیم اختلاف هدِکل (ΔH) بر تعداد افت‌ها (N_d) به‌دست می‌آید و یاد گرفتیم که خطوط جریان را به‌گونه‌ای رسم کنیم تا دبی عبوری از کانال‌های ایجاد شده توسط آنها، برابر باشد.

در ادامهٔ بحث قصد داریم تا با تکیه بر مطالب قبلی:

۱) با حل یک تمرین، نحوهٔ محاسبهٔ هدِکل و فشار آب حفره‌ای در هر نقطهٔ دلخواه از شبکه‌های جریان را به شما یاد دهیم.

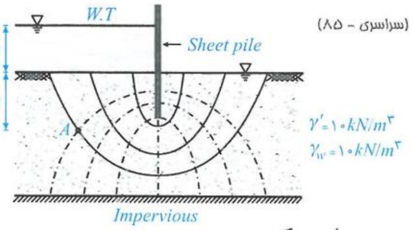
۲) فرمول محاسبهٔ دبی در شبکه‌های جریان را به‌دست آوریم.

۳) در مورد نیروی بالا برنده در زیر سازه‌های هیدرولیکی (مثل سدها) بحث کنیم و با نحوهٔ محاسبهٔ این نیرو آشنا شویم.

تذکر: در مسائل این بخش ما با یک شبکهٔ جریان ترسیم شده، مواجهیم و فرض بر آن است که کلیه قواعد و قوانین ترسیم شبکه در آن رعایت شده است.

محاسبهٔ هدکل و فشار آب حفره‌ای

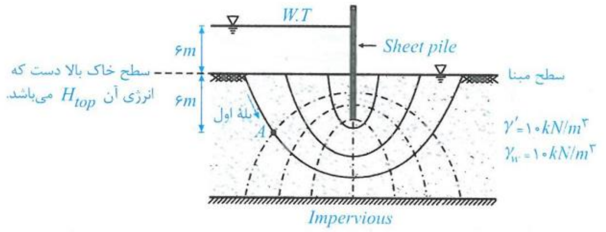
تمرین ۴۲: در شرایط روبرو، فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A چقدر است؟ (سراسری - ۸۵)



پاسخ: برای تعیین هد فشار (h_{p_A}) و محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای (u_A)، مطابق گام‌بندی زیر عمل می‌کنیم:

۱- یک سطح مبنا انتخاب می‌کنیم (به شما توصیه می‌کنیم که برای راحتی کار سطح آب پایین‌دست را انتخاب کنید).

۲- هدِکل در نقطهٔ موردنظر را به‌صورت زیر و براساس سطح مبنای انتخابی (آب پایین دست) می‌یابیم:



۹ = تعداد خطوط هم پتانسیل

$\Rightarrow$ N_d (تعداد پله‌های افت) $= ۹ - ۱ = ۸$

$\Rightarrow$ Δh (افت هد در هر پلهٔ افت) $= \dfrac{\Delta H}{N_d} = \dfrac{۶}{۸}\, m$

$H_A =$ هد بالادست $-$ تعداد پله‌های افت برای رسیدن از بالادست به نقطهٔ موردنظر $\times$ افت هد در هر پلهٔ افت $= H_{top} - (N_d)_A\ \Delta h$

$= ۶ - ۱ \times \dfrac{۶}{۸} = ۵/۲۵\, m$

← مطابق شکل مشخص است که با عبور از یک پلهٔ افت، به A رسیده‌ایم.

۳- فاصلهٔ نقطهٔ موردنظر تا سطح مبنا را می‌یابیم و از این طریق هد ارتفاع یعنی h_z آن را تعیین می‌کنیم:

$h_{z_A} = -۶\, m$ (نقطهٔ A، ۶ متر زیر سطح مبنا قرار دارد)

۴- هد ارتفاع یعنی h_z را از هدکل یعنی H کسر می‌کنیم تا هد فشار یعنی h_p به‌دست آید:

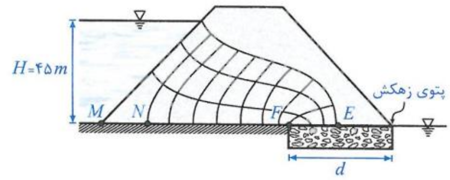
$h_{p_A} = H_A - h_{z_A} = ۵/۲۵ - (-۶) = ۱۱/۲۵\, m$

۵- فشار آب حفره‌ای را از حاصل‌ضرب هد فشار در وزن مخصوص آب می‌یابیم:

$u_A = h_{p_A} \times \gamma_w = ۱۱/۲۵ \times ۱۰ = ۱۱۲/۵\, kN/m^۲$

تمرین ۲۳: باتوجه به شکل زیر فشار آب حفره‌ای در نقطه N برحسب kPa چقدر است و نیز اگر نفوذپذیری مصالح سد همگن افـزایش یابـد، فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ N چگونه تغییر خواهد کرد؟ ($\gamma_w = 10\,kN/m^3$)

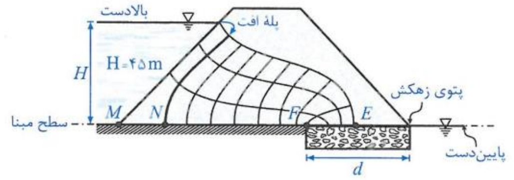
(سراسری - ۸۸)



۱) ۴۰۵، تغییر نخواهد کرد.
۲) ۴۰۰، افزایش خواهد یافت.
۳) ۴۰۵، افزایش خواهد یافت.
۴) ۴۰۰، تغییر نخواهد کرد.

حل: مشابه با تمرین قبلی، ابتدا سطح آب در پایین‌دست (سطح آب در محل پتوی زهکش) را به‌عنوان سطح مبنا انتخاب می‌کنیم. سپس توجه می‌کنیم که ۱۰ خط هم پتانسیل وجود داشته که معادل با ۹ پلهٔ افت هد است و افت هدکل نیز برابر $\Delta H = H = 45\,m$ می‌باشد.

بنابراین می‌نویسیم:



$$H_N = H_{top} - (N_d)_N\,\Delta h = 45 - 1\times(\frac{45}{9}) = 40\,m$$

$$h_{p_N} = H_N - h_{z_N} = 40 - 0 = 40\,m$$

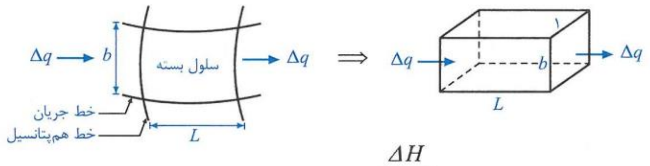
$$u_N = h_{p_N} \times \gamma_w = 40\times 10 = 400\,kPa$$

حال اگر نفوذپذیری خاک تغییر کند، طبق آخرین نکتهٔ بخش قبلی ($D-3$)، شبکهٔ جریان هیچگونه تغییری نمی‌کند و در نتیجه محاسبات ما همان محاسبات قبلی بوده و $u_N = 400\,kPa$ خواهد بود، پس می‌توان گفت گزینه (۴) پاسخ صحیح این تست است.

محاسبهٔ دبی جریان

برای محاسبهٔ دبی عبوری از زیر سپر، سد و ... به‌ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

۱) ابتدا دبی عبوری از یک کانال را که با دبی عبوری از یک سلول بسته برابر است*، با کمک قانون دارسی برای بعد عمود بر صفحهٔ واحد می‌یابیم:



$$\Delta q = VA = kiA = kA\,(\frac{\Delta h}{L}) = (k)(1\times b)(\frac{\frac{\Delta H}{N_d}}{L}) = k\,(\frac{b}{L})\frac{\Delta H}{N_d}$$

چون سلول‌های شبکه جریان معمولاً مربع‌های منحنی‌الاضلاع هستند (جز در موارد خاص که سلول در مجاورت مرزهای نفوذناپذیر است و به علت محدودیت از حالت مربعی خارج می‌شود)، بنابراین $b \simeq L$ بوده و می‌توان گفت:

$$\Delta q = k\,(\frac{\Delta H}{N_d})$$

۲) در قدم بعدی با توجه به یکسان بودن دبی عبوری از کلیه کانال‌ها، برای محاسبه دبی کل در **بعد عمود بر صفحهٔ واحد** خواهیم داشت:

$$q = N_f \times \Delta q = k\,\Delta H\,(\frac{N_f}{N_d}) \Rightarrow \boxed{q = k\,\Delta H\,(\frac{N_f}{N_d})}$$

(N_f: تعداد کانال‌های جریان , N_d : تعداد پله‌های افت)

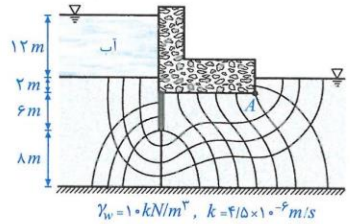
۳) در نهایت اگر طول سد یا سپر (منظور بعد عمود بر صفحه) در صورت سؤال داده شده باشد، محاسبه دبی کل در طول موردنظر به‌صورت زیر خواهد بود:

$$Q = B \times q = k\,\Delta H\,(\frac{N_f}{N_d})\,B$$

(B ← بعد عمود بر صفحه)

* اگر فرض کنیم که یک کانال عبور جریان توسط خطوط هم پتانسیل لایه‌بندی شده است، در آن‌صورت چون جریان عمود بر سطح این لایه‌هاست، بنابراین دبی عبوری از این کانال با دبی عبوری از هر لایه که همان سلول بسته است، برابر می‌باشد.

تمرین ۴۴: یک بند بتنی بر روی لایه ماسه‌ای به ضخامت ۱۶ متر قرار دارد. در پاشنهٔ بند، یک سپر به عمق ۶ متر قرار دارد. درصورتی که شبکه جریان از زیر بند مطابق شکل باشد، میزان دبی عبوری از زیربند (برای ۱۰۰ متر طول بند) و فشار آب در نقطه A کدام است؟ (سراسری - ۸۱)



$\gamma_w = ۱۰ kN/m^۳$, $k = ۴/۵ \times ۱۰^{-۶} m/s$

۱) $۲۵\ kN/m^۲$ و $۱/۸\ lit/s$

۲) $۴۰\ kN/m^۲$ و $۰/۰۱۸\ lit/s$

۳) $۲/۵\ kN/m^۲$ و $۱۸۰\ lit/s$

۴) $۴۰\ kN/m^۲$ و $۱/۸\ lit/s$

● پاسخ: در ابتدا دبی را با توجه به رابطهٔ به‌دست آمده، محاسبه می‌کنیم:

$$Q = k\,\Delta H\,(\frac{N_f}{N_d})B = (۴/۵\times ۱۰^{-۶})(۱۲)(\frac{۴}{۱۲})(۱۰۰) = ۰/۰۰۱۸\ m^۳/s = ۱/۸\ lit/s$$

در ادامه مطابق با روندی که گفته شد، فشار آب حفره‌ای A را محاسبه می‌کنیم. دقت شود که در این شبکهٔ جریان، ۱۳ خط هم پتانسیل وجود دارد که معادل با ۱۲ پلهٔ افت است. از طرفی افت هدِکل برابر $۱۲\ m$ است و برای رسیدن از بالادست به A، از ۱۰ پلهٔ افت عبور می‌کنیم. پس می‌نویسیم:

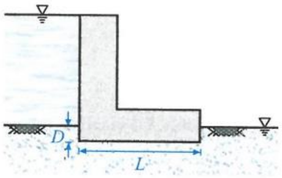
$$\begin{cases} u_A = h_{p_A} \times \gamma_w = (H_A - h_{z_A}) \times \gamma_w \\ H_A = H_t - (N_d)_A\,\Delta h = ۱۲ - ۱۰ \times (\frac{۱۲}{۱۲}) = ۲\ m \\ h_{z_A} = -۲\ m \end{cases} \Rightarrow u_A = [۲ - (-۲)] \times ۱۰ = ۴۰\ kN/m^۲$$

بنابراین گزینهٔ (۴) پاسخ درست این تست است.

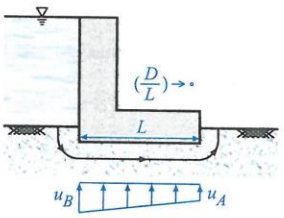
محاسبهٔ نیروی بالا برنده

منظور از **فشار بالا برنده (*uplift*)** در زیر یک سازه هیدرولیکی، همان فشار آب حفره‌ای است که نحوهٔ محاسبهٔ آن را یاد گرفتیم. برای محاسبهٔ نیروی ناشی از فشار بالابرنده که به همین نام نیز شناخته می‌شود (نیروی بالابرنده) ابتدا بایستی نمودار توزیع فشار در زیر سد ترسیم شود و سپس با محاسبهٔ سطح زیر این نمودار (مساحت نمودار) می‌توانیم نیروی بلندکننده در بعد عمود بر صفحهٔ واحد را به‌دست آوریم.

نکته: سد نشان داده شده در شکل زیر را در نظر بگیرید:



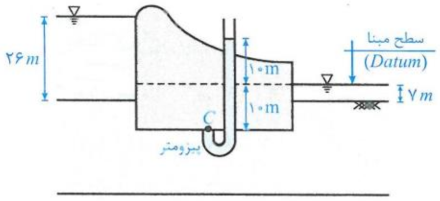
در شکل بالا چنانچه $\frac{D}{L}$ به سمت صفر میل کند، در آن‌صورت می‌توان مسیر حرکت ذرهٔ آب در زیر سد را صاف در نظر گرفته و با فرض حرکت یک‌بعدی آب در این ناحیه، تغییرات فشار آب حفره‌ای را تقریباً خطی در نظر بگیریم:



$$F_u = (\frac{u_A + u_B}{۲})L$$

در ادامه با حل چند تمرین متنوع، بر روی مطالب فوق مسلط‌تر می‌شویم.

تمرین ۲۵: باتوجه به شکل زیر، فشار بر کنش (*uplift*) در نقطهٔ C چند کیلونیوتن بر مترمربع است؟ ($\gamma_w = 10\, kN/m^3$) (سراسری - ۸۶)

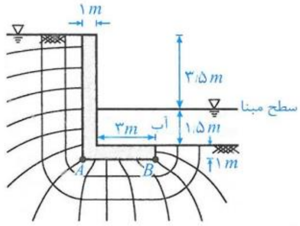


۱) ۲۵۰
۲) ۲۰۰
۳) ۱۵۰
۴) ۱۰۰

حل همانطور که گفتیم در زیر یک سد، منظور از فشار بالابرنده (یا همان برکنش = *uplift*)، همان فشار آب حفره‌ای است. چون در این سؤال فاصله سطح آب در پیزومتر تا نقطهٔ موردنظر یعنی C، مشخص و برابر $20\, m$ است، بنابراین می‌توان گفت $h_{p_C} = 20\, m$ بوده و u_C برابر است با:

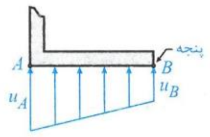
$$u_C = h_{p_C} \times \gamma_w = 20 \times 10 = 200\, kN/m^2$$

تمرین ۲۶: در شکل زیر لنگر ناشی از نیروی بالا برنده، حول پنجهٔ دیوار (B) چند $kN.m/m$ است؟ ($\gamma_w = 10\, kN/m^3$ است و تغییر فشار در زیر دیوار خطی فرض شود.)



۱) ۸۵
۲) ۱۵۳/۳
۳) ۲۷۳/۳
۴) ۳۰۶/۷

حل با فرض توزیع خطی فشار آب حفره‌ای در زیر دیوار و با توجه به سطح مبنای داده شده، خواهیم داشت:



$H_{top} = 3/5\, m$: هد بالادست

۱۵ = تعداد خطوط هم پتانسیل $\Rightarrow$ N_d (تعداد کل پله‌های افت) $= 15 - 1 = 14$

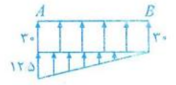
$\Rightarrow \Delta h$ (افت هد در هر پله) $= \dfrac{\Delta H}{N_d} = \dfrac{3/5}{14}$

$N_A = 7$ = تعداد پله‌های افت هد برای رسیدن از بالا دست به A

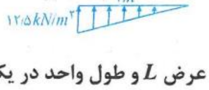
$N_B = 12$ = تعداد پله‌های افت هد برای رسیدن از بالا دست به B

$$\Rightarrow \begin{cases} u_A = h_{p_A} \times \gamma_w = (H_A - h_{z_A}) \times \gamma_w = [3/5 - 7 \times (\frac{3/5}{14}) - (-2/5)] \times 10 = 42/5\, kN/m^2 \\ u_B = h_{p_B} \times \gamma_w = (H_B - h_{z_B}) \times \gamma_w = [3/5 - 12 \times (\frac{3/5}{14}) - (-2/5)] \times 10 = 30\, kN/m^2 \end{cases}$$

و برای محاسبهٔ لنگر ناشی از آن حول پنجهٔ دیوار برای واحد بعد عمود بر صفحه می‌نویسیم:

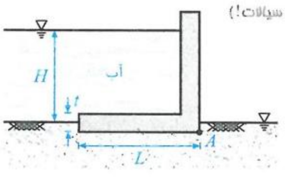


$$M = (30 \times 4 \times 1)(\frac{4}{2}) + (\frac{12/5 \times 4 \times 1}{2})(4 \times \frac{2}{3}) = 306/7\, kN.m/m$$



پس گزینهٔ (۴) صحیح است.

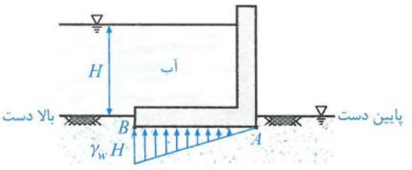
تمرین ۲۷: یک سد بتن‌آرمه به شکل گونیا با ارتفاع کم H و به عرض L و طول واحد در یک زمین نفوذپذیر مطابق شکل احداث شده است. برای اینکه سد مطابق شکل در حالت تعادل بوده و در آستانهٔ دوران حول پاشنهٔ سد باشد، با صرف‌نظر کردن از وزن سد نسبت $\dfrac{L}{H}$ کدام است؟ (مقدار ضخامت t در مقابل ابعاد آن ناچیز است) (سراسری ۸۷ - درس مکانیک سیالات!)



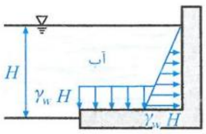
۱) $\sqrt{3}$
۲) $\dfrac{1}{\sqrt{3}}$
۳) ۱
۴) $\dfrac{\sqrt{3}}{2}$

با توجه به ناچیز بودن ضخامت سد (t) در برابر سایر ابعاد از جمله طول سد (L) می‌توان گفت که $\frac{t}{L}$ به سمت صفر میل می‌کنـد و توزیع فشار آب حفره‌ای در زیر سد خطی است. در ادامه گام‌های زیر را طی می‌کنیم:

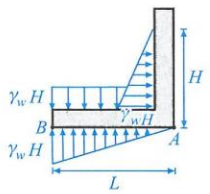
گام اول: با توجه به ناچیز فرض کردن ضخامت سد، نقطهٔ A در واقع در پایین‌دست قرار دارد و فشار آب حفره‌ای آن صفر است و نقطهٔ B در بالادست قرار داشته و فشار آب حفره‌ای آن $\gamma_w\ H$ است. پس توزیع فشار وارد بر کف سد، به‌صورت زیر خواهد بود:



گام دوم: فشار آب هیدرواستاتیک، بر قسمت قائم و افقی وارد می‌شود که نمایش نمودار توزیع آن به‌صورت زیر است:



گام سوم: برای بررسی دوران سد حول A، کافیست به‌صورت زیر تعادل دورانی را بررسی کنیم:



$$\sum M_A = ۰ \Rightarrow (\gamma_w\ H \times L \times ۱)(\frac{L}{۲}) = (\frac{\gamma_w\ H \times H \times ۱}{۲})(\frac{H}{۳}) + (\frac{\gamma_w\ H \times L \times ۱}{۲})(\frac{۲}{۳}L)$$

$$\Rightarrow \frac{۱}{۲}L^۲ = \frac{۱}{۶}H^۲ + \frac{۱}{۳}L^۲ \Rightarrow \frac{L}{H} = ۱$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

قسمت پنجم (مباحث تکمیلی حرکت آب در خاک)

E-۱- نفوذپذیری خاک و عوامل مؤثر بر آن

ضریب نفوذپذیری یا نفوذپذیری خاک (k) پارامتری است که سرعت حرکت آب در خاک به‌طور مستقیم به آن بستگی دارد. نفوذپذیری خاک را می‌توان با استفاده از رابطهٔ تجربی زیر تعیین کرد:

$$k = \bar{K}\left(\frac{\gamma_w}{\mu_w}\right)$$

در رابطه بالا $\bar{K}$ **ضریب نفوذپذیری** مطلق خاک نامیده می‌شود و به عوامل زیر بستگی دارد:

فضای خالی خاک: هر چه خاک فضای خالی بیشتری داشته باشد، نفوذپذیری مطلق آن بیشتر خواهد بود. درشت دانه بودن خاک (در مقابل ریزدانه بودن) و گرد گوشه بودن ذرات خاک (در مقابل تیزگوشه بودن) باعث افزایش فضای خالی می‌شوند. این در حالی است که هر چه دانه‌بندی خاک بهتر باشد، فضای خالی آن کمتر خواهد بود.

زبری سطح ذرات جامد: هرچه سطح ذرات جامد خاک زبرتر باشد، نفوذپذیری مطلق خاک کمتر خواهد بود.

درجه اشباع خاک: هر چه درجهٔ اشباع خاک بیشتر شود، نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد.

همچنین در رابطهٔ تعیین نفوذپذیری خاک، γ_w و μ_w به‌ترتیب وزن مخصوص و لزجت آب می‌باشند که به شرایط محیط یعنی دما بستگی دارند. افزایش دما، باعث کاهش لزجت و وزن مخصوص آب می‌شود ولی چون در اثر افزایش میزان مشخصی از دما، کاهش لزجت بیشتر از کاهش وزن مخصوص است، بنابراین می‌توان گفت که افزایش دما در کل باعث افزایش نفوذپذیری خاک می‌گردد. برای یک خاک در دو دمای مختلف می‌توان نوشت:

$$\frac{k_{\theta_2}}{k_{\theta_1}} = \frac{\gamma_{w_2}}{\gamma_{w_1}} \times \frac{\mu_{w_1}}{\mu_{w_2}}$$

بررسی یک نکته مهم

برای تعیین نفوذپذیری خاک می‌توان از روابط تجربی، مانند رابطهٔ هازن (هیزن) یا رابطهٔ کوزنی-کارمان نیز، به‌شرح زیر استفاده کرد:

الف: رابطهٔ هازن (هیزن): این رابطه در سال ۱۹۳۰ توسط هیزن ارائه شده است و ضریب نفوذپذیری را برای خاکهای ماسه‌ای نسبتاً یکنواخت و تمیز، نشان می‌دهد:

$$k = m D_{10}^2$$

اگر در رابطهٔ فوق D_{10} برحسب mm و k برحسب cm/s باشند، در آنصورت m در حدود یک درنظر گرفته می‌شود. مقدار دقیق m بین ۰/۴ تا ۱/۴ است.

ب: رابطهٔ کوزنی - کارمان: این رابطه عمدتاً در خاکهای ماسه‌ای و کم و بیش در رس‌های عادی تحکیم‌یافته* کاربرد دارد و نفوذپذیری خاک را به‌صورت زیر مشخص می‌کند:

$$k = \alpha \frac{e^{\beta}}{1+e}$$

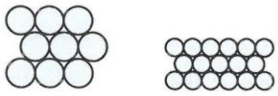
در رابطهٔ فوق α و β ضرایب تجربی می‌باشند که α بستگی به مشخصات دانه‌بندی خاک و مشخصات فیزیکی آب دارد و β نیز تقریباً برابر سه است. لازم به ذکر است که واحد α مانند واحد k می‌باشد و معمولاً برحسب cm/s است.

زیر شاخه‌های قسمت پنجم

E-۱- نفوذپذیری خاک و عوامل مؤثر بر آن
E-۲- آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری
E-۳- بررسی شبکهٔ جریان در خاک‌های ناهمسان و ناهمگن
E-۴- بررسی تراوش در سدهای خاکی

* در مورد رس عادی تحکیم یافته به‌طور مفصل در فصل هفتم صحبت خواهیم کرد.

تمرین ۲۸: دو نمونه خاک ماسه‌ای خالص با دانه‌های نسبتاً کروی مطابق شکل موجود است. $D_{۱۰}$ برای خاک A برابر ۰/۰۱ سانتی‌متر و برای خاک B برابر ۰/۰۰۲ سانتی‌متر است. کدام جمله درمورد ضریب نفوذپذیری این ۲ نمونه خاک صحیح است؟ (سراسری - ۸۸)


خاک A خاک B

۱) نفوذپذیری خاک A حدوداً ۵ برابر نفوذپذیری خاک B است.

۲) نفوذپذیری خاک A حدوداً ۲۵ برابر نفوذپذیری خاک B است.

۳) باتوجه به اینکه ضریب تراکم نمونه‌ها در مسئله داده نشده است، نمی‌توان درمورد نسبت نفوذپذیری آنها اظهارنظر کرد.

۴) باتوجه به کروی بودن دانه‌ها، حجم فضای خالی در حجم واحد از هر دو نمونه تقریباً برابر است و بنابراین نفوذپذیری هر دو خاک تقریباً برابر است.

● حل: با توجه به رابطهٔ تجربی هازن می‌توان نوشت:

$$\frac{k_A}{k_B} \simeq (\frac{D_{۱۰A}}{D_{۱۰B}})^۲ = (\frac{۰/۰۱}{۰/۰۰۲})^۲ = ۲۵$$

بنابراین گزینه (۲) پاسخ صحیح است.

تمرین ۲۹: دو نمونه خاک A و B از ماسهٔ نسبتاً یکنواخت و شسته در اختیار داریم. اگر ضریب یکنواختی این دو خاک باهم برابر بوده و $D_{۶۰}$ برای خاک A برابر $۳mm$ و برای خاک B برابر $۰/۷۵mm$ باشد، در آنصورت نفوذپذیری خاک A تقریباً چندبرابر نفوذپذیری خاک B است؟

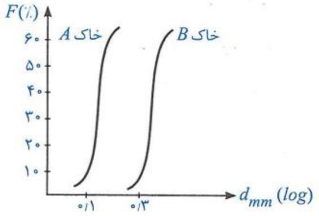
● حل: از فصل دوم به خاطر داریم که ضریب یکنواختی $C_u = \frac{D_{۶۰}}{D_{۱۰}}$ می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$(C_u)_A = (C_u)_B \Rightarrow \frac{D_{۶۰A}}{D_{۱۰A}} = \frac{D_{۶۰B}}{D_{۱۰B}} \Rightarrow \frac{۳}{D_{۱۰A}} = \frac{۰/۷۵}{D_{۱۰B}} \Rightarrow \frac{D_{۱۰A}}{D_{۱۰B}} = ۴$$

حال با استفاده از رابطهٔ هازن می‌نویسیم:

$$\frac{k_A}{k_B} \approx \frac{D_{۱۰A}^۲}{D_{۱۰B}^۲} = (\frac{D_{۱۰A}}{D_{۱۰B}})^۲ = ۴^۲ = ۱۶$$

تمرین ۳۰: منحنی دانه‌بندی دو نمونه خاک ماسه‌ای نسبتاً یکنواخت مطابق شکل زیر است. نفوذپذیری خاک A تقریباً چند برابر نفوذپذیری خاک B است؟



۱) $\frac{۱}{۳}$

۲) ۳

۳) ۹

۴) $\frac{۱}{۹}$

● حل: ابتدا از روی شکلِ منحنی دانه‌بندی، $D_{۱۰}$ را برای خاک‌های A و B می‌یابیم:

$$(D_{۱۰})_A = ۰/۱ \quad , \quad (D_{۱۰})_B = ۰/۳$$

سپس با کمک رابطهٔ هازن نسبت $\frac{k_A}{k_B}$ را به‌صورت زیر تعیین می‌کنیم:

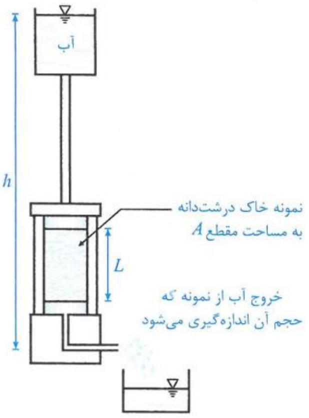
$$\frac{k_A}{k_B} \simeq (\frac{D_{۱۰A}}{D_{۱۰B}})^۲ = (\frac{۰/۱}{۰/۳})^۲ = \frac{۱}{۹}$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

برای تعیین نفوذپذیری خاکها، علاوه بر روابط تجربی، از آزمایش نیز استفاده می‌شود. این آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های صحرایی (به‌صورت درجا) می‌باشند که دقت بیشتری در مقایسه با روابط تجربی دارند. در بخش بعد، این آزمایش‌ها را شرح می‌دهیم.

E-۲- آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری

آزمایش با بار آبی ثابت در آزمایشگاه:



در شکل روبرو اصول کلی دستگاه آزمایش نشان داده شده است. این آزمایش بر روی **نمونهٔ دست‌نخورده‌ای** از **خاک درشت‌دانه** انجام می‌گیرد، به این ترتیب که نمونهٔ استوانه‌ای از خاک را در داخل محفظهٔ دستگاه آزمایش قرار داده و مدتی از آن آب عبور می‌دهند تا همه هوای آن خارج شود. بعد از خروج کامل هوای خاک و اشباع شدن نمونه، حجم آب گذرنده از آن (V) در زمانی معین (t) مشخص می‌شود و سپس براساس آن ضریب نفوذپذیری خاک به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

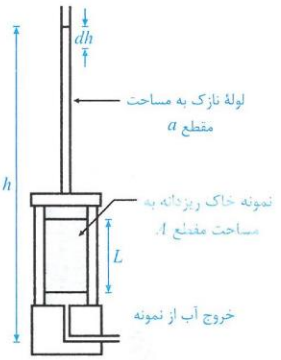
$$Q = kA\left(\frac{\Delta H}{L}\right) \quad , \quad Q = \frac{V}{t} \quad , \quad \Delta H = h \Rightarrow \boxed{k = \frac{VL}{hAt}}$$

تمرین ۳۱: **استوانه‌ای از خاک به سطح مقطع $۶۰cm^۲$ و ارتفاع $۱۲cm$ تحت آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت قرار می‌گیرد. اگر اختلاف بار بین ابتدا و انتهای استوانه $۱۵cm$ بوده و مقدار آب جمع شده در ظرف طی مدت ۱۰۰ ثانیه، برابر $۳۰cm^۳$ باشد، در آن صورت ضریب نفوذپذیری خاک چند cm/s خواهد بود؟**

پاسخ:

$$k = \frac{VL}{hAt} = \frac{۳۰\times۱۲}{۱۵\times۶۰\times۱۰۰} = ۰/۰۰۴\,cm/s$$

آزمایش با بار آبی متغیر (هد اُفتان) در آزمایشگاه:



در شکل روبرو اصول کلی دستگاه آزمایش نشان داده شده است. این آزمایش بر روی **نمونهٔ دست نخورده‌ای** از **خاک ریزدانه** انجام می‌گیرد، به این ترتیب که نمونهٔ استوانه‌ای را داخل محفظهٔ دستگاه آزمایش قرار داده و مدتی از آن آب عبور می‌دهند تا همه هوای آن خارج شود. بعد از خروج کامل هوای خاک و اشباع شدن نمونه، در زمانی مشخص (t) افت سطح آب در لوله نازک بالای نمونه (پیزومتر)، اندازه‌گیری می‌شود و سپس براساس آن ضریب نفوذپذیری خاک به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

با نوشتن رابطهٔ پیوستگی جریان بین مقطع خاک و مقطع لوله نازک که به‌ترتیب آنها را با اندیس‌های (۱) و (۲) نشان می‌دهیم، خواهیم داشت:

$$Q_۱ = Q_۲ \Rightarrow (a)\left(\frac{-dh}{dt}\right) = kA\left(\frac{h}{L}\right) \Rightarrow -\frac{dh}{h} = \left(\frac{kA}{aL}\right)dt$$

اگر در شروع آزمایش ($t_۱$) اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه، برابر $h_۱$ و در آخر آزمایش ($t_۲$) برابر $h_۲$ باشد، در آنصورت با انتگرال‌گیری از رابطهٔ بالا بین حدود مربوط به ابتدا و انتهای آزمایش، خواهیم داشت:

$$-\int_{h_۱}^{h_۲}\frac{dh}{h} = \frac{kA}{aL}\int_{t_۱}^{t_۲}dt \Rightarrow ln\left(\frac{h_۱}{h_۲}\right) = \frac{kA}{aL}(t_۲ - t_۱)$$

مدت زمان آزمایش، $t_۲ - t_۱$ است که آن را با t (همان زمان مشخص) نشان داده و می‌نویسیم:

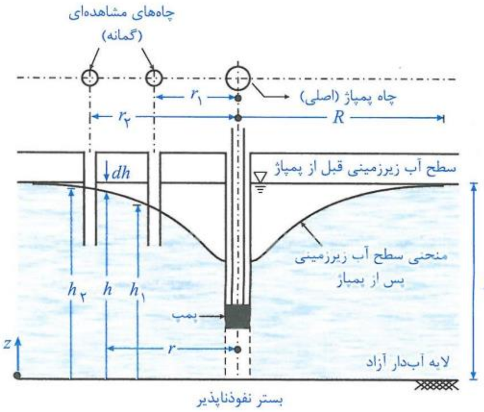
$$\boxed{k = \frac{aL}{At}ln\left(\frac{h_۱}{h_۲}\right)}$$

تمرین ۳۲: **در یک آزمایش نفوذپذیری با بار آبی متغیر، مساحت نمونهٔ خاک ۱۰۰ برابر مساحت لولهٔ قائم بوده و طول آن $۱۲cm$ است. اگر اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه در شروع آزمایش برابر $۹۰cm$ و پس از مدت ۲۰ دقیقه برابر $۶۰cm$ شود، در آنصورت ضریب نفوذپذیری خاک چند cm/s خواهد بود؟**

پاسخ:

$$k = \frac{aL}{At}ln\left(\frac{h_۱}{h_۲}\right) = \frac{(۱)(۱۲)}{(۱۰۰)(۲۰\times۶۰)}ln\left(\frac{۹۰}{۶۰}\right) = ۰/۰۰۰۱\,ln\,۱/۵\,cm/s \xrightarrow{\text{ماشین حساب}} k \simeq ۴\times۱۰^{-۵}\,cm/s$$

● **آزمایش پمپاژ برای تعیین ضریب نفوذپذیری یک لایه خاک آبدار در صحرا:**



این آزمایش که برای **خاک‌های درشت‌دانه همگن** مناسب است، به‌صورت درجا در محل انجام می‌شود و یک آزمایش صحرایی است. مطابق شکل یک لایه خاک آبدار آزاد را درنظر بگیرید. نحوهٔ انجام آزمایش به این شکل است که ابتدا چاه اصلی و دو چاه کم‌قطر (گمانه) با فاصله شعاعی r_1 و r_2 از چاه اصلی حفر می‌شوند. سپس آب با دبی ثابت Q از چاه اصلی پمپاژ می‌شود و هنگامی که سطح آب در چاه اصلی و گمانه‌ها ثابت ماند (یعنی جریان پمپاژ شده حالت دائمی پیدا کرد)، آنگاه تراز سفرهٔ آب زیرزمینی یا همان سطح آب در چاه اصلی و گمانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در انتها نیز ضریب نفوذپذیری خاک را می‌توان از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi\left(h_2^2 - h_1^2\right)}$$

در مورد آزمایش پمپاژ به نکات تکمیلی زیر توجه کنید:

۱) هرچه گمانه‌ها از چاه اصلی دورتر شوند، سطح آب در آنها بالاتر خواهد رفت. اگر گمانه را آنقدر از چاه اصلی دور کنیم تا سطح آب در آن برابر سطح سفره آب زیرزمینی قبل از پمپاژ شود، در آنصورت فاصله مرکز گمانه تا مرکز چاه اصلی را **شعاع تأثیر** می‌گویند که آن را با r_e نشان می‌دهند.

۲) ارتفاع سطح آب در چاه اصلی (h_w) به ازای شعاع چاه (r_w) به‌دست می‌آید.

۳) اگر به‌جای لایهٔ آبدار آزاد، لایهٔ آبدار بسته داشته باشیم (یعنی لایه‌ای که از دو طرف به لایهٔ نفوذناپذیر یا کم‌نفوذ محدود شده و تحت فشار باشد)، در آنصورت با درنظر گرفتن H به‌عنوان ضخامت لایه، می‌توان ضریب نفوذپذیری این لایه را طبق رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi H\left(h_2 - h_1\right)}$$

E-۳- بررسی شبکهٔ جریان در خاک‌های ناهمسان و ناهمگن

الف) خاک‌های ناهمسان

در ابتدای قسمت چهارم از این فصل (بحث شبکهٔ جریان) دیدیم که معادله پیوستگی جریان در حالت دو بعدی به‌صورت زیر می‌باشد.

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0$$

حال اگر از تغییرمتغیر $X = x\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ و $Z = z$ استفاده کنیم، در مختصات جدید، خاک همسان می‌شود و معادلهٔ بالا به فرم زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Z^2} = 0$$

این یعنی ما به معادلهٔ لاپلاس رسیده‌ایم که حل آن با روش ترسیمی منجر به رسم شبکه جریان می‌شود.

لازم به ذکر است که چون ما خاک را همسان می‌کنیم (البته به‌صورت فرضی و جهت انجام محاسبات)، بنابراین نفوذپذیری خاک نیز به‌صورت معادل و طبق رابطهٔ زیر که قبلاً خوانده‌ایم، محاسبه می‌شود:

$$k_e = \sqrt{k_x\, k_z}$$

حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که در ترسیم شبکهٔ جریان و کاربرد آن، به‌هنگام مواجه شدن با خاک ناهمسان چه باید کرد؟

در پاسخ باید بگوییم که با توجه به مطالب گفته شدهٔ بالا، به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

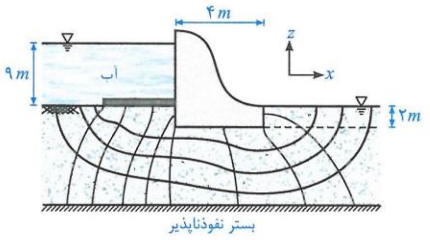
۱- در رسم شبکه جریان می‌توان از روش مربوط به خاکهای همسان استفاده کرد، با این توضیح که فواصل افقی در امتداد x بایستی براساس مقیاس $\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ اصلاح شوند. یعنی به هنگام رسم سازه و ناحیه جریان، فواصل افقی را باید در $\sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ ضرب کنیم.

۲- محاسبه دبی عبوری (از واحد بعد عمود بر صفحه) از زیر سازه، براساس ضریب نفوذپذیری معادل خاک (حالت همسان شده) و طبق رابطه زیر خواهد بود:

$$q = \Delta H \frac{N_f}{N_d}\sqrt{k_z k_x}$$

۳- محاسبه فشار آب حفره‌ای در حالت ناهمسان و حالت همسان شده یکسان بوده و تفاوتی باهم ندارند. علت آن است که فشار آب حفره‌ای بر مبنای ارتفاع قائم ستون آب در پیزومتر محاسبه می‌شود، حال آنکه مختصات قائم (z) تغییر نکرده است.

تمرین ۳۳: شبکه جریان زیر، پس از تغییر در مختصات محور x رسم شده است. اگر برای این خاک درحالت طبیعی $k_x = ۳/۶\times۱۰^{-۵} m/s$ و $k_z = ۴\times۱۰^{-۶} m/s$ باشند، دبی عبوری و نیروی بالابرنده درواحد طول سد، چقدر می‌باشند؟ توزیع فشار در زیر سد خطی بوده و $\gamma_w = ۱۰ kN/m^۳$ است.



حل: باتوجه به شکل، $\Delta H = ۹m$ ، $N_f = ۴$ و $N_d = ۹$ است، بنابراین برای به‌دست آوردن دبی عبوری داریم:

$$q = \Delta H \frac{N_f}{N_d}\sqrt{k_z k_x} = (۹)(\frac{۴}{۹})\sqrt{(۴\times۱۰^{-۶})(۳/۶\times۱۰^{-۵})} = ۴۸\times۱۰^{-۶} m^۳/s = ۰/۰۴۸\ lit/s$$

برای محاسبهٔ نیروی بالابرنده، ابتدا بایستی مقادیر فشار آب حفره‌ای در ابتدا و انتهای زیر سد ($u_۱, u_۲$) را به‌دست آوریم:

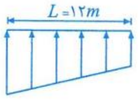
$$u_۱ = \left[۹ - ۵\times(\frac{۹}{۹}) - (-۲)\right](۱۰) = ۶۰\ kN/m^۲ \quad (\text{ابتدا = سمت چپ در زیر سد})$$

$$u_۲ = \left[۹ - ۷\times(\frac{۹}{۹}) - (-۲)\right](۱۰) = ۴۰\ kN/m^۲ \quad (\text{انتها = سمت راست در زیر سد})$$

مقادیر به‌دست آمده برای فشار آب حفره‌ای مربوط به مختصات جدید (مختصات تغییریافته) می‌باشند ولی می‌دانیم که این مقادیر برای هر دو مختصات قدیم و جدید یکی است. پس در حالت واقعی (مختصات قدیم) هم، فشار آب حفره‌ای در ابتدا و انتهای سد، همین مقادیر می‌باشند.

اما عرض سد که در شکل مسئله برابر ۴ متر نشان داده شده است، واقعی نیست، زیرا پس از تغییر در مختصات برابر ۴ متر شده است. مقدار واقعی عرض سد برابر است با:

$$X = x\sqrt{\frac{k_z}{k_x}} \Rightarrow ۴ = L\sqrt{\frac{۴\times۱۰^{-۶}}{۳/۶\times۱۰^{-۵}}} \Rightarrow L = ۱۲m$$



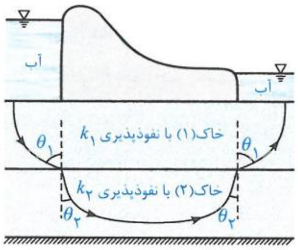
حالا با فرض خطی بودن توزیع فشار آب در زیر سد خواهیم داشت:

$$F_u = (\frac{u_۱ + u_۲}{۲})L = (\frac{۶۰+۴۰}{۲})(۱۲) = ۶۰۰\ kN/m$$

ب) خاک‌های ناهمگن: در ترسیم شبکه جریان برای یک خاک ناهمگن (لایه‌بندی شده) باید در مرز مشترک بین لایه‌ها، شبکهٔ جریان را اصلاح کنیم. اما این چه اصلاحی است و برچه مبنایی انجام می‌شود؟

اگر امتداد حرکت آب در یک خاک با نفوذپذیری $k_۱$ به‌گونه‌ای باشد که با راستای قائم زاویهٔ $\theta_۱$ بسازد، در آنصورت پس از ورود آب به خاک دیگری با نفوذپذیری $k_۲$، امتداد حرکت آب با راستای قائم، زاویهٔ $\theta_۲$ خواهد بود. در این حالت رابطهٔ بین $\theta_۲$ و $\theta_۱$ به‌صورت زیر است:

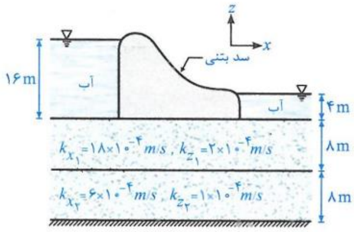
$$\frac{tan\theta_۲}{tan\theta_۱}=\frac{k_۲}{k_۱}$$



دقت کنید که به هنگام رسم خطوط جریان، این نکته بایستی رعایت شود. برای درک بهتر موضوع به خط جریان رسم شده در شکل مقابل توجه کنید که مربوط به تراوش دوبعدی در خاکی ناهمگن است که در زیر یک سد قرار دارد.

باتوجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که $k_۱ > k_۲$ است، زیرا $\theta_۱ > \theta_۲$ می‌باشد.

اگر خاکِ زیر سازه ناهمسان و ناهمگن باشد، در آنصورت ابتدا ضریب نفوذپذیری معادل خاک را به‌دست می‌آوریم، یعنی خاک را همگن و سپس همسان می‌کنیم. سپس به هنگام ترسیم سازه و ناحیه جریان، اثر تغییر متغیر در امتداد افقی x را لحاظ می‌کنیم.



تمرین ۳۴: شکل مقابل یک خاک ناهمگن را در زیر سد بتنی نشان می‌دهد. اگر پس از تغییر مختصات در جهت x، شبکه جریان را ترسیم کنیم، تعداد خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل به‌ترتیب ۴ و ۹ خواهد بود. دبی عبوری از واحد طول سد، چند $m^۳/s.m$ است؟

حل:

$$k_{x(eq)}=\frac{k_{x_۱}H_۱+k_{x_۲}H_۲}{H_۱+H_۲}=\frac{(۱۸\times۱۰^{-۴})(۸)+(۶\times۱۰^{-۴})(۸)}{۸+۸}=۱۲\times۱۰^{-۴}\,m/s$$

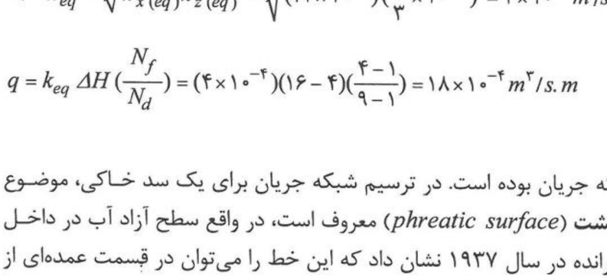
$$k_{z(eq)}=\frac{H_۱+H_۲}{\frac{H_۱}{k_{z_۱}}+\frac{H_۲}{k_{z_۲}}}=\frac{۸+۸}{(\frac{۸}{۲\times۱۰^{-۴}})+(\frac{۸}{۱\times۱۰^{-۴}})}=\frac{۴}{۳}\times۱۰^{-۴}\,m/s$$

$$\Rightarrow\ k_{eq}=\sqrt{k_{x(eq)}k_{z(eq)}}=\sqrt{(۱۲\times۱۰^{-۴})(\frac{۴}{۳}\times۱۰^{-۴})}=۴\times۱۰^{-۴}\,m/s$$

$$q=k_{eq}\,\Delta H(\frac{N_f}{N_d})=(۴\times۱۰^{-۴})(۱۶-۴)(\frac{۴-۱}{۹-۱})=۱۸\times۱۰^{-۴}\,m^۳/s.m$$

E-۴- بررسی تراوش در سدهای خاکی

بررسی تراوش در سدهای خاکی یکی از نخستین کاربردهای شبکه جریان بوده است. در ترسیم شبکه جریان برای یک سد خاکی، موضوع اصلی یافتن خط جریان فوقانی است. این خط جریان که به **خط نشت** (*phreatic surface*) معروف است، در واقع سطح آزاد آب در داخل سد خاکی را مشخص می‌کند که فشار روی آن صفر است. کاساگرانده در سال ۱۹۳۷ نشان داد که این خط را می‌توان در قسمت عمده‌ای از طول خود، یک سهمی درجه دو درنظر گرفت که به آن **سهمی مبنا** می‌گویند. شکل زیر، یک سد خاکی را نشان می‌دهد که در انتهای پایین‌دست خود، توسط یک **پتوی زهکش** (*Drainage blanket*) که از مصالح درشت‌دانه تهیه شده و به‌صورت افقی قرار گرفته، زهکشی می‌شود. لازم به ذکر است که پتوی زهکش باعث صفر شدن فشار آب حفره‌ای می‌گردد.



باتوجه به شکل صفحهٔ قبل می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) سهمی مبنا از نقطهٔ D شروع می‌شود و در نقطهٔ E، محور xها را قطع می‌کند. نقطهٔ F نیز کانون سهمی است.

۲) نقطهٔ C که خط اخراجی از آن، در نقطهٔ شروع سهمی بر سهمی مماس است، در فاصلهٔ $۰/۳AB$ از سد قرار دارد، یعنی $BC = ۰/۳AB$ است.

۳) دبی عبوری از واحد طول سد (واحد بعد عمود بر صفحه) را می‌توان با استفاده از سهمی مبنا، از رابطه زیر محاسبه کرد:

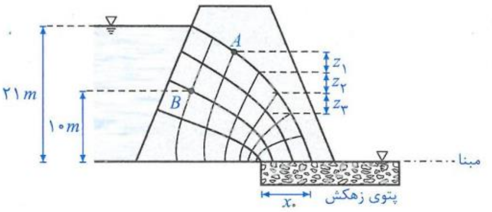
$$q = ۲kx_۰$$

که در این رابطه k ضریب نفوذپذیری هسته رسی در سد خاکی است و $x_۰$ هم در شکل مشخص می‌باشد.

۴) در نقاط G و F خط هم پتانسیل و خط جریان بر هم عمود نیستند. نقطهٔ F همانطور که گفته شد کانون سهمی است و نقطهٔ G نیز نقطهٔ بحرانی نامیده می‌شود.

تمرین ۳۵: درشکل روبرو، شبکه جریان عبوری از یک سد خاکی نشان داده شده است. ضریب نفوذپذیری خاک (هسته رسی) ۱۰ متر بر روز می‌باشد. باتوجه به سایر اطلاعات داده شده در شکل، به سؤالات زیر پاسخ دهید.

$(\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳)$



الف) دبی گذرنده از واحد طول سد چند $m^۳/day.m$ است؟

ب) فشار آب حفره‌ای در نقاط A و B برحسب $kN/m^۲$ چقدر است؟

ج) مقدار $x_۰$ چند متر است؟

د) چه رابطه‌ای بین $z_۱$، $z_۲$ و $z_۳$ وجود دارد؟

● حل:

الف)

$$q = k\,\Delta H\left(\frac{N_f}{N_d}\right) \quad , \quad k = ۱۰\ m/day \quad , \quad \Delta H = ۲۱\ m \quad , \quad N_f = ۴ \quad , \quad N_d = ۷$$

$$\Rightarrow\ q = (۱۰)(۲۱)\left(\frac{۴}{۷}\right) = ۱۲۰\ m^۳/day.m$$

ب)

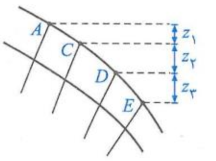
$u_A = ۰$ (چون A روی خط نشت قرار دارد)

$$\begin{cases} u_B = h_{p_B} \times \gamma_w = (H_B - h_{z_B}) \times \gamma_w \\ H_B = H_t - (N_d)_B\, \Delta h = ۲۱ - ۱ \times \left(\frac{۲۱}{۷}\right) = ۱۸\ m \\ h_{z_B} = ۱۰\ m \end{cases} \qquad \Rightarrow\ u_B = (۱۸ - ۱۰) \times ۱۰ = ۸۰\ kN/m^۲$$

ج)

$$q = ۲kx_۰ \ \Rightarrow\ ۱۲۰ = ۲ \times ۱۰ \times x_۰ \ \Rightarrow\ x_۰ = ۶\ m$$

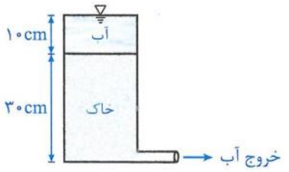
د)



$$\begin{cases} \Delta h_{AC} = \Delta h_{CD} = \Delta h_{DE} = \dfrac{\Delta H}{N_d} = \dfrac{۲۱}{۷} = ۳\ m \\ \Delta u_{AC} = \Delta u_{CD} = \Delta u_{DE} = ۰ \\ \Delta h = \Delta h_p + \Delta h_z = ۰ + \Delta h_z = \Delta h_z \end{cases}$$

$$\Rightarrow\ \Delta h_{z_{AC}} = \Delta h_{z_{CD}} = \Delta h_{z_{DE}} = ۳\ m \ \Rightarrow\ z_۱ = z_۲ = z_۳ = ۳\ m$$

تمرین ۳۶: در شکل زیر دبی عبوری از تودهٔ خاک با قطر $۲۰ cm$ و ضریب نفوذپذیری $۷/۵ \times ۱۰^{-۳} cm/s$، چند لیتر در ثانیه است؟



حل: فاصله بین سطح آزاد آب در بالادست و سطح فشار صفر در پایین‌دست (خروجی آب) برابر ۴۰ سانتی‌متر $(۴۰ = ۳۰ + ۱۰)$ است که در واقع همان ΔH می‌باشد. باتوجه به سایر اطلاعات داده شده درصورت سؤال، خواهیم داشت:

$$Q = kA\left(\frac{\Delta H}{L}\right) = (۷/۵ \times ۱۰^{-۳})\left(\frac{\pi}{۴} \times ۲۰^{۲}\right)\left(\frac{۴۰}{۳۰}\right) = \pi \ cm^{۳}/s = ۰/۰۰۳۱۴ \ lit/s$$

تمرین ۳۷: پاسخ‌های معادله $k^{۲} - ۱۲ \times ۱۰^{-۵} k + ۲ \times ۱۰^{-۹} = ۰$، نفوذپذیری یک خاک را در دو راستای x و y برحسب cm/s نشان می‌دهند. ضریب نفوذپذیری خاک در راستایی که با محور xها زاویه ۴۵° می‌سازد چقدر است؟

۱) $۳ \times ۱۰^{-۴} cm/s$ ۲) $۳ \times ۱۰^{-۵} cm/s$

۳) $\frac{۱}{۳} \times ۱۰^{-۴} cm/s$ ۴) $\frac{۱}{۳} \times ۱۰^{-۵} cm/s$

حل: ابتدا ضریب نفوذپذیری خاک را در امتداد $\alpha = ۴۵°$ می‌یابیم:

$$\frac{۱}{k_s} = \frac{\cos^{۲}\alpha}{k_x} + \frac{\sin^{۲}\alpha}{k_y} \xrightarrow{\alpha = ۴۵°} \frac{۱}{k_s} = \frac{\cos^{۲}۴۵}{k_x} + \frac{\sin^{۲}۴۵}{k_y} \Rightarrow k_s = \frac{۲k_x k_y}{k_x + k_y}$$

حال با کمک معادلهٔ درجهٔ دوم داده شده، خواهیم داشت:

$$\underbrace{}_{a=۱} k^{۲} \underbrace{-۱۲ \times ۱۰^{-۵}}_{b} k + \underbrace{۲ \times ۱۰^{-۹}}_{c} = ۰$$

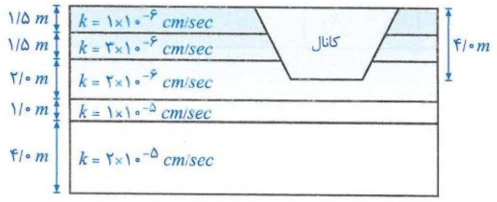
$$\Rightarrow \underbrace{k_x + k_y}_{\text{حاصل جمع ریشه‌ها}} = -\frac{b}{a} = -\frac{-۱۲ \times ۱۰^{-۵}}{۱} = ۱۲ \times ۱۰^{-۵}$$

$$\underbrace{k_x k_y}_{\text{حاصل ضرب ریشه‌ها}} = \frac{c}{a} = \frac{۲ \times ۱۰^{-۹}}{۱} = ۲ \times ۱۰^{-۹}$$

پس مقدار k_s برابر می‌شود با:

$$k_s = \frac{۲ \times ۲ \times ۱۰^{-۹}}{۱۲ \times ۱۰^{-۵}} = \frac{۱}{۳} \times ۱۰^{-۴} \ cm/s \quad \Rightarrow$$ گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۳۸: درون یک خاک با لایه‌بندی نشان داده شده در شکل زیر، کانالی حفر می‌شود. اگر جریان به‌صورت افقی و قائم از کناره‌ها و به‌صورت قائم از پایین وارد کانال شود، با فرض یکسان بودن ضریب نفوذپذیری افقی و قائم برای کلیه لایه‌ها (همسان بودن هر لایه)، اولاً نسبت نفوذپذیری معادل در راستای افقی به قائم را برای جریانی که از کناره‌ها وارد کانال می‌شود، به‌دست آورید. ثانیاً ضریب نفوذپذیری معادل خاک برای جریانی که از پایین وارد کانال می‌شود را برحسب cm/s محاسبه کنید.



حل:

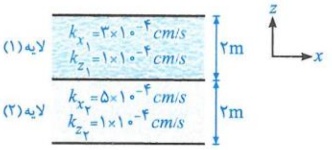
قسمت اول:

$$\begin{cases} k_{x(e)} = \dfrac{k_1H_1 + k_2H_2 + k_3H_3}{H_1 + H_2 + H_3} = \dfrac{(1\times10^{-6}\times1/5 + 3\times10^{-6}\times1/5 + 2\times10^{-6}\times1)}{1/5+1/5+1} = 2\times10^{-6}\ cm/s \\ k_{z(e)} = \dfrac{H_1 + H_2 + H_3}{\dfrac{H_1}{k_1} + \dfrac{H_2}{k_2} + \dfrac{H_3}{k_3}} = \dfrac{1/5+1/5+1}{\dfrac{1/5}{1\times10^{-6}} + \dfrac{1/5}{3\times10^{-6}} + \dfrac{1}{2\times10^{-6}}} = 1/6\times10^{-6}\ cm/s \end{cases} \Rightarrow \dfrac{k_{x(e)}}{k_{z(e)}} = \dfrac{2\times10^{-6}}{1/6\times10^{-6}} = 1/25$$

قسمت دوم:

$$k_{z(e)} = \frac{H_3 + H_4 + H_5}{\dfrac{H_3}{k_3} + \dfrac{H_4}{k_4} + \dfrac{H_5}{k_5}} = \frac{4+1+1}{\dfrac{1}{2\times10^{-6}} + \dfrac{1}{1\times10^{-5}} + \dfrac{4}{2\times10^{-5}}} = 7/5\times10^{-6}\ cm/s$$

تمرین ۳۹: ضریب نفوذپذیری معادل در پروفیل خاک روبرو چقدر است؟



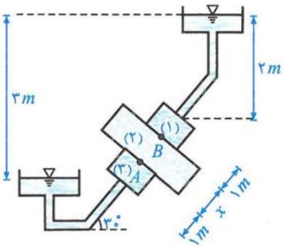
حل: این خاک ناهمسان و ناهمگن است که برای تعیین k معادل به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$k_{x(e)} = \frac{1}{H_0}(k_{x_1}H_1 + k_{x_2}H_2) = \frac{1}{4}(3\times10^{-4}\times2 + 5\times10^{-4}\times2) = 4\times10^{-4}\ cm/s$$

$$k_{z(e)} = \frac{H_0}{\dfrac{H_1}{k_{z_1}} + \dfrac{H_2}{k_{z_2}}} = \frac{4}{\dfrac{2}{1\times10^{-4}} + \dfrac{2}{1\times10^{-4}}} = 1\times10^{-4}\ cm/s$$ (خاک در راستای z همگن است.)

$$k_e = \sqrt{k_{x(e)}k_{z(e)}} = \sqrt{(4\times10^{-4})(1\times10^{-4})} = 2\times10^{-4}\ cm/s$$

تمرین ۴۰: برای اینکه اختلاف ارتفاع آب در دو پیزومتری که در نقاط B و A قرار می‌دهیم، برابر $0/1\,m$ باشد، به چه طولی از خاک (۲) نیاز داریم؟ (d قطر نمونه‌هاست و $d_2 = 2d_1 = 2d_3$ ، $k_1 = k_3 = 2k_2$)



۱) $1m$

۲) $0/5m$

۳) $2m$

۴) هرگز این اتفاق رخ نمی‌دهد.

حل: ارتفاع آب در پیزومتری که در یک نقطه قرار می‌گیرد (h_p) نشان‌دهندهٔ هد فشار در آن نقطه است. باتوجه به اطلاعات داده شده درصورت سؤال و با فرض $(h_p)_B > (h_p)_A$ می‌نویسیم:

$$(h_p)_B - (h_p)_A = 0/1$$

$$\Delta H = \Delta h_p + \Delta h_z \Rightarrow \Delta H_{BA} = \Delta h_2 = 0/1 + x\sin30 = 0/1 + \frac{x}{2} \qquad (I)\ \text{رابطهٔ}$$

حال مقدار Δh_2 را براساس رابطهٔ گفته شده در متن درس $(C-1)$ تعیین می‌کنیم:

$$\Delta h_2 = \frac{(\frac{L}{Ak})_2}{\sum(\frac{L}{Ak})}\Delta H = \frac{\left[\dfrac{x}{\frac{\pi d_2^2}{4}\times k_2}\right]}{\dfrac{1}{(\frac{\pi d_1^2}{4})\times k_1} + \dfrac{x}{(\frac{\pi d_2^2}{4})\times k_2} + \dfrac{1}{(\frac{\pi d_3^2}{4})\times k_3}}\times3 = \frac{\dfrac{x}{2^2\times1}}{\dfrac{1}{1^2\times2} + \dfrac{x}{2^2\times1} + \dfrac{1}{1^2\times2}}\times3 = \frac{0/75x}{1+0/25x} \qquad (II)\ \text{رابطهٔ}$$

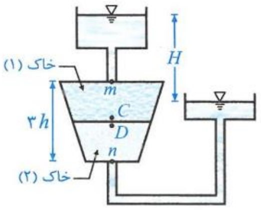
و در نهایت مقادیر به‌دست آمده برای Δh_2 را از روابط (I) و (II) با هم مساوی قرار می‌دهیم تا مقدار x به‌دست آید:

$$0/1+\frac{x}{2}=\frac{0/75x}{1+0/25x} \Rightarrow x=1m \ , \ x=0/8m$$

بنابراین گزینه (۱) پاسخ صحیح این تست است.

توجه: با امتحان گزینه‌ها در مرحلهٔ آخر نیز می‌توانید جواب $x=1$ را انتخاب کنید.

تمرین ۴۱: شکل زیر آزمایش بار آبی ثابت را نشان می‌دهد که در آن ظرف آزمایش به شکل مخروط ناقص با قطر قاعدهٔ $3h$ در بالای آن و شیب ۳ (قائم) به ۱ (افقی) می‌باشد. اگر نسبت گرادیان هیدرولیکی در نقطه m به n برابر $\frac{1}{3}$ باشد، نسبت گرادیان هیدرولیکی در نقطهٔ C به D کدام است؟

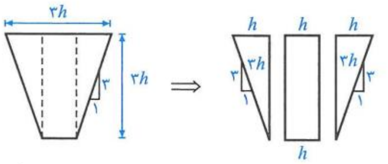


۱) $\frac{1}{3}$
۲) ۱
۳) ۳
۴) $\frac{4}{9}$

چون امتداد جریان عمود بر لایه‌های خاک است (آرایش سری لایه‌ها)، بنابراین می‌توانیم طبق رابطهٔ پیوستگی جریان بنویسیم:

$$Q_m=Q_n \Rightarrow k_m i_m A_m = k_n i_n A_n$$

با توجه به اینکه قطر مقطع بالایی برابر $3h$ بوده و شیب مخروط ۳ به ۱ است، می‌توان به‌راحتی نتیجه گرفت که قطر مقطع پایینی برابر h است.



حال با دانستن قطر مقطع n، می‌نویسیم:

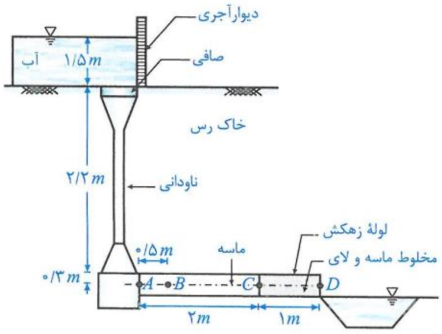
$$(k_1)(\frac{1}{3}i_n)[\frac{\pi}{4}\times(3h)^2]=(k_2)(i_n)[\frac{\pi}{4}\times(h)^2] \Rightarrow k_2=3k_1$$

و در ادامه برای نقاط C و D خواهیم داشت:

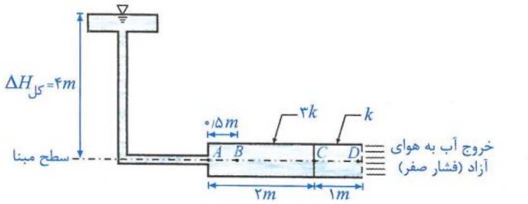
$$Q_C=Q_D \Rightarrow k_1 i_C A_C = k_2 i_D A_D \xrightarrow[k_2=3k_1]{A_C=A_D} \frac{i_C}{i_D}=3$$

پس گزینه (۳) درست است.

تمرین ۴۲: یک لولهٔ زهکش افقی مطابق شکل مفروض است. در اثر طوفان این لوله توسط ۱ متر مخلوط ماسه و لای و ۲ متر ماسه پر می‌شود. اگر وضعیت سطح آزاد آب بعد از طوفان، مطابق شکل ۱/۵ متر بالاتر از سطح زمین باشد و بدانیم که نفوذپذیری خاک ماسه‌ای سه برابر خاک مخلوط است، در آنصورت فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B (واقع بر محور لوله) چند kPa است؟ ($\gamma_w=10\,kN/m^3$)



حل: برای شروع، لولهٔ محتوی خاک را جدا می‌کنیم و ناودانی به همراه آب بالای آن را به‌صورت یک لولهٔ قائم محتوی آب نشان می‌دهیم:



حالا یک آرایش سری از لایه‌های خاک داریم که می‌توانیم افت هد هر کدام از لایه‌ها را به‌صورت زیر به‌دست آوریم:

$$\frac{L}{Ak}\ \text{نسبت} \begin{cases} \text{لایهٔ } AC \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{AC} = \frac{2}{A\times 3k} = \frac{2}{3}(\frac{1}{Ak}) = \frac{2}{3}x \\ \text{لایهٔ } CD \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{CD} = \frac{1}{A\times k} = \frac{1}{Ak} = x \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta h_{AC} = \frac{\frac{2}{3}x}{\frac{2}{3}x + x}\times 4 = 1/6\ m \quad , \quad \Delta h_{CD} = \Delta H_{کل} - \Delta h_{AC} = 4 - 1/6 = 2/4\ m$$

چون تغییرات هدکل در داخل لوله در قسمت AC خطی است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\Delta h_{AB} = \Delta h_{AC}\,(\frac{L_{AB}}{L_{AC}}) = 1/6\times(\frac{0/5}{2}) = 0/4\ m$$

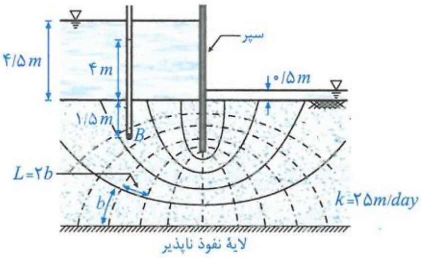
و از آنجا می‌توان H_B را با توجه به سطح مبنای مشخص شده، به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Delta h_{AB} = H_A - H_B \Rightarrow 0/4 = 4 - H_B \Rightarrow H_B = 3/6\ m$$

و در نهایت u_B برابر است با:

$$u_B = h_{p_B}\times\gamma_w = (H_B - h_{z_B})\times\gamma_w = (3/6 - 0)\times 10 = 36\ kPa$$

تمرین ۴۳: باتوجه به شکل زیر، دبی گذرنده از واحد بعد سوم سپر (بعد عمود بر صفحه) و نیز مقدار فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B را به‌دست آورید. (مجرای مجاور لایه نفوذناپذیر مستطیلی بوده و نسبت ابعاد آن مطابق شکل است)



حل:

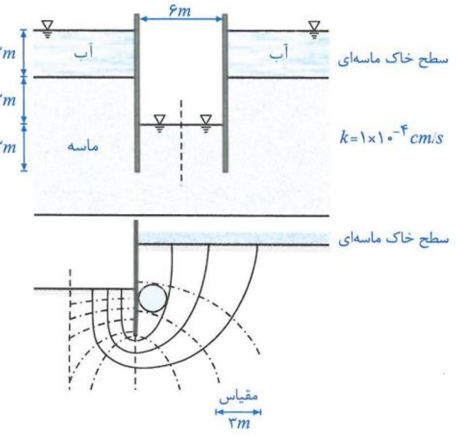
$$q = q\,(\text{مربعی‌ها}) + q\,(\text{مستطیلی}) = k\,\Delta H\,(\frac{N_{f_1}}{N_d}) + k\,\Delta H\,(\frac{N_{f_2}}{N_d})(\frac{b}{L})$$

$$= k\,(\frac{\Delta H}{N_d})(N_{f_1} + N_{f_2}\frac{b}{L}) = (25)(\frac{4}{12})(4 + 1\times\frac{1}{2}) = 37/5\ m^3/day.m$$

$$u_B = (h_p)_B\,\gamma_w = (4+1/5)(10) = 55\ kN/m^2$$

توجه کنید که در کانال مستطیلی (در این مسئله) $\frac{b}{L} = \frac{1}{2}$ بود، درحالیکه در کانال‌های مربعی $\frac{b}{L} = 1$ است.

تمرین ۴۴: برای احداث پایه یک پل در بستر رودخانه لازم است تا در این ناحیه، حفاری شده و آب رودخانه تخلیه گردد. به‌همین منظور یک سد موقت به عرض ۵ متر (بعد عمود بر صفحه) با کوبیدن دو ردیف سپر فلزی جهت محافظت از ناحیه محصورشده ایجاد می‌شود. در داخل سد موقت ۳ متر حفاری شده و آب درون آن به بیرون پمپاژ می‌گردد. دبی آب در جریان به داخل سد چقدر است؟ (برحسب مترمکعب بر ثانیه در متر طول)

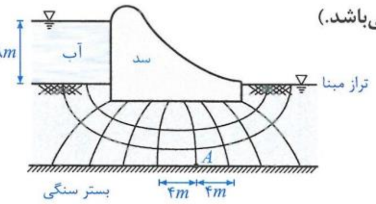


● حل: آب از دو طرف (کناره‌ها) به ناحیه قرار گرفته در میان دو سپر جریان دارد و برای محاسبهٔ دبی بایستی این موضوع را لحاظ کنیم.

$$q = \boxed{۲}\, k\, \Delta H \left(\frac{N_f}{N_d}\right) = (۲)(۱\times۱۰^{-۴}\times \boxed{۱۰^{-۲}})(۶)\left(\frac{۴}{۱۰}\right) = ۴/۸\times۱۰^{-۶}\ m^۳/s.m$$

جریان آب از دو طرف — تبدیل cm/s به m/s

تمرین ۴۵: در شبکهٔ جریان نشان‌داده شده در شکل زیر، سرعت تراوش آب در نقطهٔ A چند cm/s است؟ (نسبت تخلخل خاک $e=1$ و نفوذپذیری آن در دو امتداد x و z به‌ترتیب برابر $k_x = ۳۶\times۱۰^{-۵}\ m/s$ و $k_z = ۴\times۱۰^{-۵}\ m/s$ می‌باشد.)



۱) ۰/۰۰۶
۲) ۰/۰۱۲
۳) ۰/۰۲
۴) ۰/۰۴

● حل: می‌دانیم ترسیم شبکهٔ جریان برای خاک‌های ناهمسان درصورتی امکان دارد که خاک را با تغییرمتغیر، به‌صورت فرضی، همسان کنیم. در این شرایط ضریب نفوذپذیری خاک نیز به‌صورت معادل لحاظ می‌شود. در این‌سؤال در شرایط نشان داده شده در شکل، خاک همسان فرض شده است، بنابراین برای محاسبهٔ V_s می‌نویسیم:

$$V = k_e\, i = k_e\left(\frac{\Delta h}{L}\right) \;,\; \Delta h = \frac{\Delta H}{N_d} = \frac{۱۸}{۹} = ۲\ m \;,\; k_e = \sqrt{k_x\, k_z} = \sqrt{۴\times۱۰^{-۵}\times۳۶\times۱۰^{-۵}} = ۱۲\times۱۰^{-۵}\ m/s$$

$$\Rightarrow V = ۱۲\times۱۰^{-۵}\times\left(\frac{۲}{۴}\right) = ۶\times۱۰^{-۵}\ m/s$$

$$V_s = \frac{V}{n} \;,\; n = \frac{e}{1+e} = \frac{۱}{۱+۱} = ۰/۵ \Rightarrow V_s = \frac{۶\times۱۰^{-۵}}{۰/۵} = ۱۲\times۱۰^{-۵}\ m/s = ۰/۰۱۲\ cm/s$$

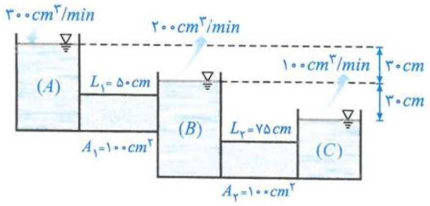
توجه: شما می‌توانید برای به‌دست آوردن سرعت حرکت آب در خاک (V)، از خاک ناهمسان نیز استفاده کنید، به‌این ترتیب که:

$$\begin{cases} V = V_x = k_x\, i_x = k_x\left(\dfrac{\Delta h}{L_x}\right) \\ k_x = ۳۶\times۱۰^{-۵}\ m/s \\ \Delta h = \dfrac{\Delta H}{N_d} = \dfrac{۱۸}{۹} = ۲\ m \\ L_x = L\times\sqrt{\dfrac{k_x}{k_z}} = ۴\times\sqrt{\dfrac{۳۶\times۱۰^{-۵}}{۴\times۱۰^{-۵}}} = ۱۲\ m \end{cases}$$

$$\Rightarrow V = V_x = ۳۶\times۱۰^{-۵}\times\left(\frac{۲}{۱۲}\right) = ۶\times۱۰^{-۵}\ m/s \quad \Rightarrow V_s = \frac{V}{n} = \frac{۶\times۱۰^{-۵}}{۰/۵} = ۱۲\times۱۰^{-۵}\ m/s = ۰/۰۱۲\ cm/s$$

که همان جواب قبلی است و گزینهٔ (۲) جواب این تست است.

تمرین ۴۶: سه مخزن نشان داده شده در شکل مقابل توسط دو لوله که از خاک متخلخل پر شده‌اند، به هم متصل‌اند. اگر جریانی با شدت $300\,cm^3/min$ به مخزن (A) وارد و با شدت‌های $200\,cm^3/min$ و $100\,cm^3/min$ به‌ترتیب از مخزن‌های B و C خارج شود و سطح آب در هر سه مخزن ثابت و مطابق ترازهای داده شده باشد، در آن‌صورت ضریب نفوذپذیری خاک‌های متخلخل چند cm/min است؟



حل: ابتدا دبی جریان در لایه‌های خاک را تشخیص می‌دهیم:

$$Q_1 = Q_{A\ \text{ورودی به}} = 300\,cm^3/s$$

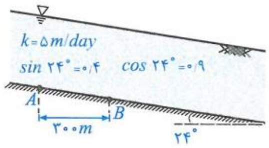
$$Q_1 = Q_{B\ \text{خروجی از}} + Q_2 \Rightarrow 300 = 200 + Q_2 \Rightarrow Q_2 = 100\,cm^3/min \quad \text{یا} \quad (Q_2 = Q_{C\ \text{خروجی از}} = 100\,cm^3/min)$$

حال با توجه به رابطهٔ $Q = kiA$، ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها را به‌دست می‌آوریم:

$$Q_1 = k_1 i_1 A_1 = k_1 (\frac{\Delta H_1}{L_1}) A_1 \Rightarrow 300 = k_1 \times \frac{30}{50} \times 100 \Rightarrow k_1 = 5\,cm/min$$

$$Q_2 = k_2 i_2 A_2 = k_2 (\frac{\Delta H_2}{L_2}) A_2 \Rightarrow 100 = k_2 \times \frac{30}{75} \times 100 \Rightarrow k_2 = 2/5\,cm/min$$

تمرین ۴۷: در شکل مقابل چقدر طول می‌کشد تا ذرهٔ آب، از نقطهٔ A به نقطهٔ B برسد؟ (برحسب روز)

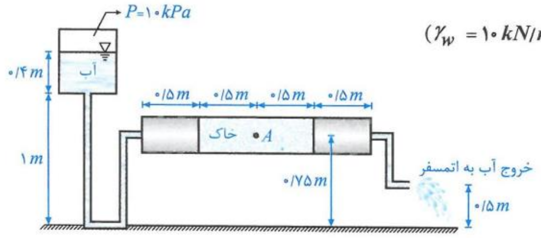


حل: با توجه به مطالب گفته شده در متن درس، می‌دانیم که گرادیان هیدرولیکی در این لایه خاک برابر $i = \sin\alpha$ می‌باشد. حال با استفاده از رابطهٔ دارسی می‌نویسیم:

$$V = ki \Rightarrow \frac{\Delta x}{t} = 5 \times \sin 24^\circ = 5 \times 0/4 = 2 \Rightarrow t = \frac{\Delta x}{2} = \frac{\frac{300}{\cos 24^\circ}}{2} = \frac{150}{0/9} = 166/67\ (day)$$

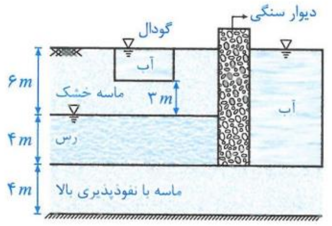
تست‌های فصل چهارم

۱- در شکل زیر فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A چند کیلوپاسکال است؟ ($\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$)



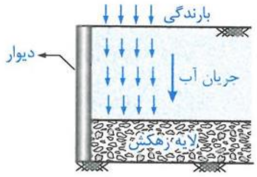
۱) ۹/۵
۲) ۸/۲۵
۳) ۷
۴) ۲

۲- شکل زیر گودالی را نشان می‌دهد که در خاک ماسه‌ای حفرشده و پس از عایق‌بندی از آب پر می‌شود. مقدار گرادیـان هیـدرولیکی در لایـه رسی واقع در زیر گودال چقدر است؟



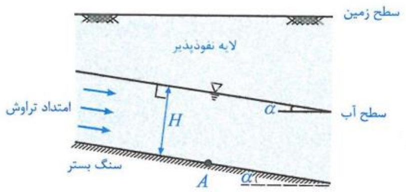
۱) $\frac{۹}{۴}$
۲) $\frac{۴}{۹}$
۳) $\frac{۱}{۴}$
۴) ۱/۵

۳- در شکل زیر آب ناشی از بارندگی به‌صورت جریانی پیوسته در امتداد قائم به لایه زهکش تحتانی رسیده و تخلیه می‌شود. فـشار منفـذی در لایه زهکش صفر فرض می‌گردد. گرادیان هیدرولیکی در خاک پشت دیوار برابر کدام است؟ (سراسری - ۹۳)



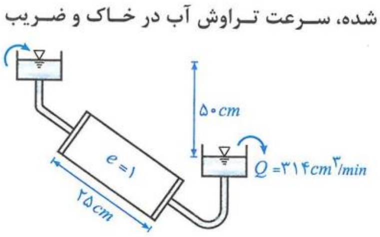
۱) ۰
۲) ۱
۳) $\frac{۱}{۲}$
۴) ۲

۴- مطابق شکل زیر تراوش آب در یک لایهٔ ماسه‌ای به نفوذپذیری $k = ۵\times۱۰^{-۳}\,cm/sec$ نشان داده شده است. با فرض $H = ۱۰m$ و $\alpha = ۲۵^\circ$، فشار آب حفره‌ای در نقطه A چقدر است؟ ($sin\,۲۵^\circ = ۰/۴$, $cos\,۲۵^\circ = ۰/۹$, $\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$)



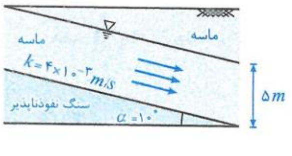
۱) $۴۰\,kPa$
۲) $۵۴\,kPa$
۳) $۸۱\,kPa$
۴) $۹۰\,kPa$

۵- اگر قطر نمونهٔ خاک نشان داده شده در شکل زیر برابر $۱۰cm$ باشد، باتوجه به اطلاعات داده شده، سـرعت تـراوش آب در خـاک و ضـریب نفوذپذیری نمونه موردنظر به‌ترتیب برابرند با:



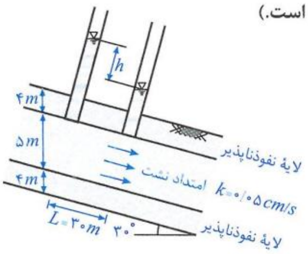
۱) $۲cm/min$, $۴cm/min$
۲) $۲cm/min$, $۸cm/min$
۳) $۱cm/min$, $۴cm/min$
۴) $۱cm/min$, $۸cm/min$

۶- میزان تراوش در واحد عرض در شرایط شکل نشان داده شده چه مقدار خواهد بود؟ برحسب لیتر بر ثانیه در واحد عرض (۱ متر) (سراسری - ۸۴)



۱) $۲۰\,cos\,۱۰^\circ$
۲) $۱۰\,cos\,۲۰^\circ$
۳) $۲۰\,sin\,۱۰^\circ$
۴) $۱۰\,sin\,۲۰^\circ$

۷- مطابق شکل زیر یک لایه نفوذپذیر (تراوا) بین دو لایه نفوذناپذیر قرار داشته و آب از داخل آن جریان دارد. اگر دبی آب نشتی $3\sqrt{3}\ m^3/hr.m$ باشد، مقدار h چقدر است؟ (شکل در امتداد نشت به مقیاس کشیده نشده است.)



۱) $\frac{۴۰}{\sqrt{۳}}$ متر
۲) ۳۰ متر
۳) ۲۰ متر
۴) $\frac{۱۰}{\sqrt{۳}}$ متر

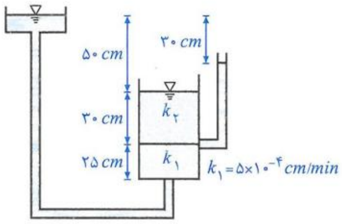
۸- اگر ضرایب نفوذپذیری خاکی در امتداد محورهای x و y به‌ترتیب k_x ، $k_y = \frac{1}{3}k_x$ باشند، در آن صورت ضریب نفوذپذیری خاک در امتداد ۳۰° نسبت به محور yها برابر کدامیک از مقادیر زیر است؟

۱) $2k_x$　۲) $\frac{k_x}{2}$　۳) $0/4k_x$　۴) $4k_y$

۹- هرگاه نسبت ضرایب نفوذپذیری یک خاک در دو جهت عمود بر هم به نسبت ۱ به ۲ باشد، ضریب نفوذپذیری معادل (هم‌ارز) چند برابر ضریب نفوذپذیری در جهت بیشتر است؟

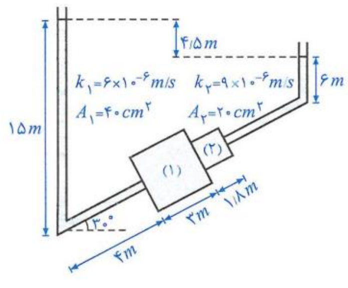
۱) ۲　۲) $\frac{1}{2}$　۳) $\sqrt{2}$　۴) $\frac{\sqrt{2}}{2}$

۱۰- باتوجه به اطلاعات داده شده در شکل، نفوذپذیری خاک دو (k_2) برابر است با:



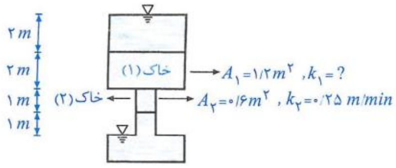
۱) $1/8\times10^{-4}\ cm/min$
۲) $9\times10^{-4}\ cm/min$
۳) $4\times10^{-4}\ cm/min$
۴) $6\times10^{-4}\ cm/min$

۱۱- در شکل زیر، فشار آب حفره‌ای در مرز بین دو لایه خاک (۱) و (۲) کدام است؟ $(\gamma_w = 10\ kN/m^3)$



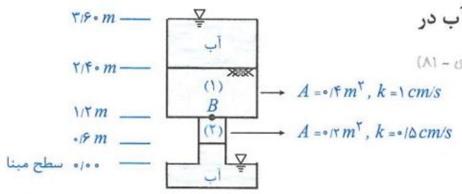
۱) $95\ kN/m^2$
۲) $75\ kN/m^2$
۳) $70\ kN/m^2$
۴) $90\ kN/m^2$

۱۲- در شکل مقابل دو خاک (۱) و (۲) با مشخصات داده شده مدنظر است. اگر بار فشار در خاک (۱) مقدار ثابتی باشد، ضریب نفوذپذیری آن (k_1) چقدر است؟



۱) $1\ m/min$　۲) $0/5\ m/min$
۳) $0/25\ m/min$　۴) $0/75\ m/min$

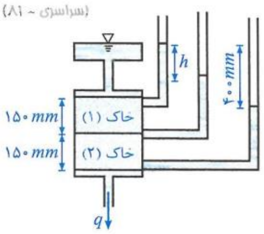
۱۳- دو نمونه خاک با مشخصات داده شده در یک ظرف قرار گرفته‌اند، مقدار فشار آب در نقطه B چند kN/m^2 است؟ $(\gamma_w = 10\ kN/m^3)$ (سراسری - ۸۱)



۱) ۶　۲) ۱۲
۳) ۱۸　۴) ۲۴

۱۴- اگر بدانیم نفوذپذیری خاک (۱) سه‌برابر نفوذپذیری خاک (۲) است، سطح آب در پیزومتر واقع در مرز دو خاک، در چه ترازی می‌ایستد؟ (h چند mm است؟)

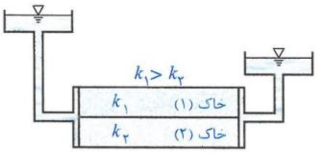
(سراسری ~ ۸۱)



۱) ۱۰۰
۲) ۱۳۳/۳
۳) $۱۰۰\sqrt{۳}$
۴) $۳۰۰\sqrt{۳}$

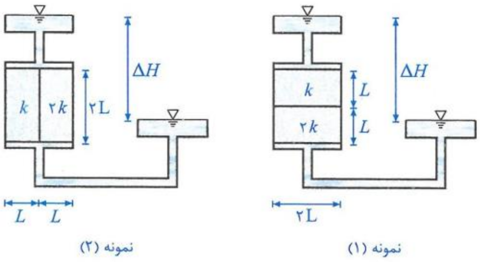
۱۵- جریان افقی آب از دو خاک ۱ و ۲ مطابق شکل عبور می‌کند. اگر k_1 و k_2 به‌ترتیب نفوذپذیری، V_1 و V_2 سرعت جریان آب و i_1 و i_2 گرادیان هیدرولیکی در خاکهای (۱) و (۲) باشند، کدام روابط صحیح است؟

(سراسری ~ ۸۵)



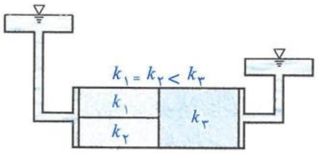
۱) $V_1 > V_2$ و $i_1 > i_2$
۲) $V_2 > V_1$ و $i_1 > i_2$
۳) $V_2 > V_1$ و $i_1 = i_2$
۴) $V_1 > V_2$ و $i_1 = i_2$

۱۶- شکل زیر دو نمونه خاک را نشان می‌دهد که از نظر ابعاد کاملاً یکی بوده و تحت آزمایش با بار آبی ثابت و یکسان قرار گرفته‌اند. نسبت دبی عبوری از نمونهٔ (۱) به دبی عبوری از نمونهٔ (۲) کدام است؟



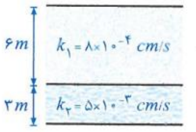
۱) $\frac{۹}{۴}$
۲) $\frac{۴}{۹}$
۳) $\frac{۸}{۹}$
۴) $\frac{۹}{۸}$

۱۷- جریان آب مطابق شکل از خاک‌های (۱)، (۲) و (۳) عبور می‌کند. اگر k_1 و k_2 و k_3 نفوذپذیری و i_1، i_2 و i_3 گرادیان هیدرولیکی در خاک‌های (۱)، (۲) و (۳) باشند، کدام رابطه صحیح است؟



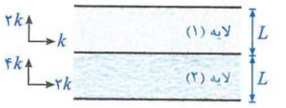
۱) $i_1 = i_2 > i_3$
۲) $i_1 = i_2 < i_3$
۳) $i_1 = i_2 = i_3$
۴) $i_1 < i_2 < i_3$

۱۸- در شکل زیر ضریب نفوذپذیری خاک در راستای افقی تقریباً چند برابر نفوذپذیری خاک در راستای قائم است؟



۱) ۰/۵
۲) ۲
۳) ۱
۴) ۱/۵

۱۹- ضریب نفوذپذیری معادل در خاک نشان داده شده در شکل زیر چقدر است؟

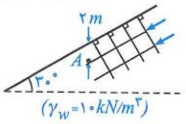


۱) $\frac{۳}{۲}k$
۲) $\frac{۸}{۳}k$
۳) $۲k$
۴) $۴k$

۲۰- اگر در ترسیم شبکه جریان عبوری از زیر یک سد تعداد کانال‌های جریان دوبرابر شوند، در آن‌صورت دبی عبوری از زیر سد چه تغییری خواهد کرد؟

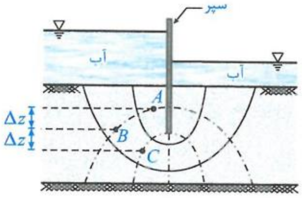
۱) تغییری نمی‌کند.
۲) دوبرابر می‌شود.
۳) نمی‌توان به‌طور دقیق اظهارنظر کرد.
۴) نصف می‌شود.

۲۱- در شیب خاکی زیر خطوط جریان و هم‌پتانسیل به‌ترتیب موازی و عمود بر سطح شیبدار هستند. فشار آب (u) در نقطه A در عمق $d = 2m$ چقدر است؟ (سراسری - ۷۴)



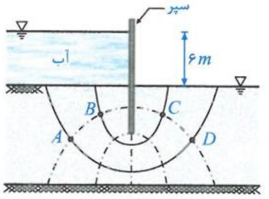
۱) $10\sqrt{3}\ kN/m^2$
۲) $15\ kN/m^2$
۳) $20\ kN/m^2$
۴) $15\sqrt{3}\ kN/m^2$

۲۲- اگر Δh نشان‌دهندهٔ افت بار آبی بین دو خط هم‌پتانسیل در شبکهٔ جریان شکل زیر باشد و $\Delta h < \Delta z$، در آن‌صورت فشار آب حفره‌ای در کدام‌یک از نقاط نشان‌داده شده در شکل بیشتر است؟



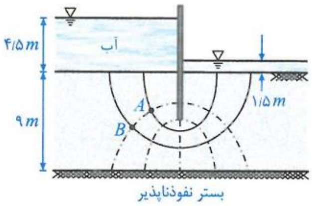
۱) A
۲) B
۳) C
۴) فشار در نقاط A و B برابر بوده و از فشار در نقطهٔ C بیشتر است.

۲۳- شکل زیر، شبکهٔ جریان ترسیم شده در زیر یک دیوارهٔ سپری را نشان می‌دهد. نقاط B و C روی یک تراز افقی قرار گرفته‌اند و نقاط A و D نیز، هم‌ترازند. کدام عبارت درمورد فشار آب حفره‌ای این نقاط صحیح است؟



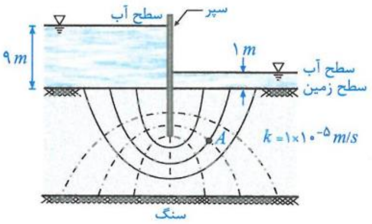
۱) $u_A > u_B > u_C$
۲) فشار آب حفره‌ای در هر چهار نقطه یکسان است.
۳) $u_B > u_D = u_A > u_C$
۴) $u_A = u_D > u_B = u_C$

۲۴- باتوجه به شبکهٔ جریان رسم شده برای سپر فلزی، اختلاف سطح آب در پیزومترهای نصب شده در نقاط A و B چقدر خواهد بود؟ (فاصله قائم نقاط A و B از بستر نفوذناپذیر به‌ترتیب ۴/۵ و ۲/۵ متر است.)



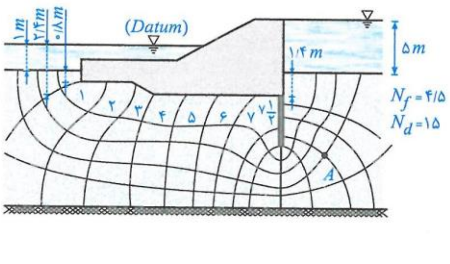
۱) ۰/۵ متر
۲) ۵ متر
۳) صفر
۴) ۲ متر

۲۵- شکل زیر شبکه جریان از زیر یک دیوارهٔ سپری را نشان می‌دهد. اگر ارتفاع آب در طرفین دیوار به‌ترتیب ۹ متر و ۱ متر باشد، دبی کل از زیر دیواره برحسب m^3/s و فشار آب حفره‌ای برحسب kN/m^2 در نقطهٔ A که به فاصله ۸ متر از سطح زمین قرار دارد چقدر است؟ طول دیوارهٔ سپری ۲۰ متر است. $(\gamma_w = 10\, kN/m^3)$ (سراسری - ۷۹)



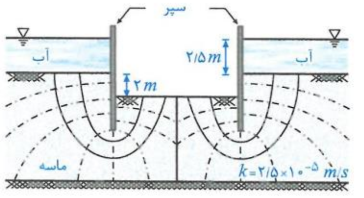
۱) $u_A = 80$ ، $Q = 4\times10^{-5}$
۲) $u_A = 80$ ، $Q = 8\times10^{-4}$
۳) $u_A = 110$ ، $Q = 4\times10^{-5}$
۴) $u_A = 110$ ، $Q = 8\times10^{-4}$

۲۶- در نقطهٔ A پیزومتری نصب شده است و نفوذپذیری خاک $2/5\times10^{-5}\ m/s$ می‌باشد. کدام عبارت صحیح است؟ (سراسری - ۸۳)



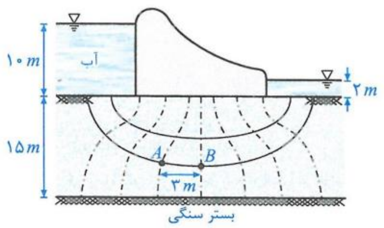
۱) میزان دبی در واحد طول برابر $3\times10^{-5}\ m^3/s$ می‌باشد.
۲) میزان دبی در واحد طول برابر $4\times10^{-5}\ m^3/s$ می‌باشد.
۳) سطح پیزومتریک در نقطه A منطبق بر سطح آب بالادست می‌باشد.
۴) سطح پیزومتریک در نقطه A ۱/۲ متر پایین‌تر از سطح آب در بالادست می‌باشد.

۲۷- در شبکه جریان نشان داده شده در شکل زیر، میزان ورود جریان آب به داخل ناحیه گودبرداری شده بین دو سپر، برای طول ۲۰ متر از سپر چقدر است؟



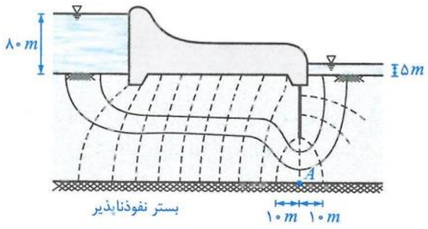
۱) $۰/۰۳۷۵\times ۱۰^{-۳}\ m^{۳}/s$
۲) $۰/۰۷۵\times ۱۰^{-۳}\ m^{۳}/s$
۳) $۱/۵\times ۱۰^{-۳}\ m^{۳}/s$
۴) $۰/۷۵\times ۱۰^{-۳}\ m^{۳}/s$

۲۸- در شکل زیر گرادیان هیدرولیکی بین دو نقطه A و B در خاک کدام است؟



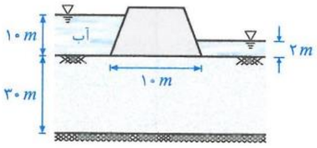
۱) $\frac{۱}{۳}$
۲) $\frac{۲}{۳}$
۳) $\frac{۱}{۲}$
۴) $\frac{۳}{۴}$

۲۹- در مقطع داده شده از یک سد بتنی، شبکه جریان در پی سد مطابق شکل می‌باشد. اگر ضریب نفوذپذیری خاک بستر $k=۸\times۱۰^{-۴}$ (m/sec) و درصد پوکی (n) آن ۵۰ باشد، سرعت جریان آب در نقطه A چند سانتی‌متر بر ثانیه خواهد بود؟ (سراسری - ۹۰)



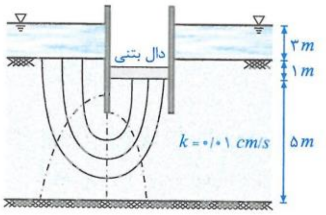
۱) ۰/۰۲
۲) ۰/۰۴
۳) ۰/۰۶
۴) ۰/۰۸

۳۰- اگر مصالح خاکی زیر سد بتنی نشان داده شده، همگن و ایزوتروپیک باشد، مقدار نیروی بالابرنده (uplift) زیر سد در طول واحد، با فرض تغییرات خطی از بالادست به سمت پایین‌دست چقدر است؟ (سراسری - ۷۳)

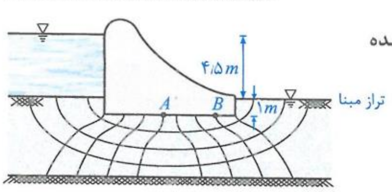


۱) ۱۰۰ تن بر متر طول سد
۲) ۱۵۰ تن بر متر طول سد
۳) ۶۰ تن بر متر طول سد
۴) ۳۰۰ تن بر متر طول سد

۳۱- در یک لایه آبرفتی به ضخامت ۶ متر، دو پرده سپر و یک دال بتنی بین آنها اجرا گردیده است. دال بتنی در عمق یک متری از سطح زمین واقع شده است. مطلوب است محاسبه فشار بالابر (uplift) اعمال شده به دال بتنی. $(\gamma_w = ۱۰۰۰\ kg/m^{۳})$ (سراسری - ۷۶)



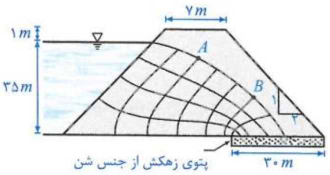
۱) $۳۵۰۰\ kg/m^{۲}$
۲) $۵۰۰۰\ kg/m^{۲}$
۳) $۴۰۰۰\ kg/m^{۲}$
۴) $۶۰۰۰\ kg/m^{۲}$



۳۲- شبکه جریان گذرنده از زیر یک سد مطابق شکل مقابل رسم شده است. فشار بالا برنده (uplift) در نقاط A و B به‌ترتیب چند کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد؟

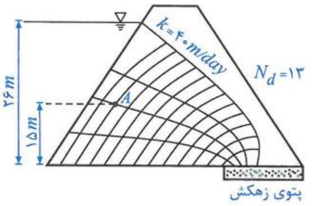
۱) ۲۰۰۰ و ۳۵۰۰
۲) ۳۵۰۰ و ۲۰۰۰
۳) ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰
۴) ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰

۳۳- در سد خاکی نشان داده شده در شکل زیر، فاصله قائم A و B از یکدیگر چقدر است؟



۱) ۱۵ متر
۲) ۲۰ متر
۳) ۲۵ متر
۴) ۳۰ متر

۳۴- برای یک سد خاکی، شبکه جریان مطابق شکل زیر رسم شده است. اگر طول این سد $100\,m$ باشد، در آن صورت دبی گذرنده از طول این سد و فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A به‌ترتیب برابر است با: ($\gamma_w = 10\,kN/m^3$)



۱) $370\,kN/m^2$ ، $24000\,m^3/day$
۲) $370\,kN/m^2$ ، $32000\,m^3/day$
۳) $70\,kN/m^2$ ، $24000\,m^3/day$
۴) $70\,kN/m^2$ ، $32000\,m^3/day$

مباحث تکمیلی حرکت آب در خاک

۳۵- دراثر افزایش درجه حرارت محیط، وزن مخصوص و ویسکوزیته آب موجود در خاکی به‌ترتیب ۰/۹ و ۰/۶ مقدار اولیه می‌شوند. در این حالت نفوذپذیری این خاک چند برابر مقدار اولیه خواهد شد؟

۱) ۰/۶ ۲) ۱/۵ ۳) ۲/۲۵ ۴) ۰/۴۴

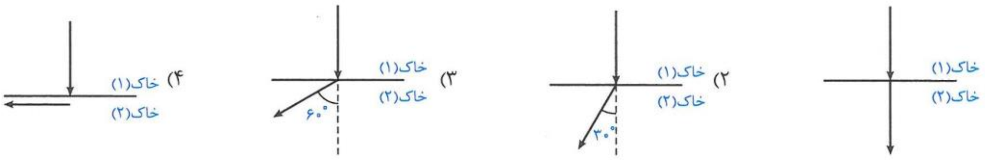
۳۶- دو خاک ماسه‌ای نسبتاً یکنواخت با ضرایب یکنواختی $C_{u_1} = 6$ و $C_{u_2} = 12$ موجود است. اگر ۶۰ درصد ذرات هر دو خاک از ۳ میلیمتر کوچکتر باشند، در آنصورت نسبت ضریب نفوذپذیری خاک (۲) به خاک (۱) کدام است؟

۱) ۴ ۲) $\frac{1}{4}$ ۳) ۲ ۴) $\frac{1}{2}$

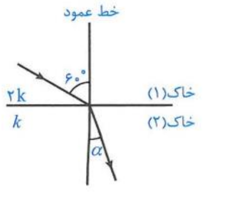
۳۷- چنانچه دو نمونهٔ تست قبل را تحت آزمایش با بار آبی یکسان و ثابت قرار دهیم، در آن‌صورت نسبت سرعت تراوش نمونهٔ دوم به نمونهٔ اول کدام است؟ (طول هر دو نمونه در آزمایش یکسان است و نسبت تخلخل نمونه‌ها به‌ترتیب $e_1 = 0/25$ و $e_2 = 0/5$ می‌باشد)

۱) ۰/۳ ۲) ۰/۱۵ ۳) ۰/۶ ۴) ۰/۲۵

۳۸- جریان آب مطابق شکل زیر از خاک (۱) با نفوذپذیری $3k$ وارد خاک (۲) با نفوذپذیری k می‌شود. کدامیک از شکل‌های زیر، امتداد صحیح حرکت آب در خاک (۲) را نشان می‌دهد؟

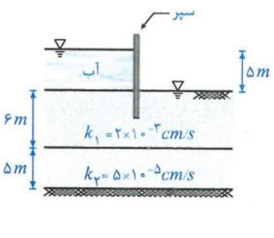


۳۹- جریان آب در دو لایه خاک با نفوذپذیری‌های متفاوت، مطابق شکل زیر است. زاویه α را تعیین کنید.



۱) $\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$ ۲) $\tan^{-1}\left(2\sqrt{3}\right)$
۳) $\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{6}\right)$ ۴) $\tan^{-1}\left(2\frac{\sqrt{3}}{3}\right)$

۴۰- در شکل مقابل برای ترسیم شبکه جریان در زیر سپر، کدام راهکار را پیشنهاد می‌کنید؟



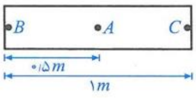
۱) با محاسبه ضریب نفوذپذیری معادل برای خاک لایه‌بندی شده، آن را همگن کرده و سپس شبکه جریان را ترسیم کنیم.
۲) عمق فرورفته سپر در خاک را به‌صورت مجازی تا لایهٔ زیرین افزایش داده و شبکهٔ جریان را بر آن اساس رسم کنیم.
۳) لایهٔ خاک زیرین با نفوذپذیری کمتر را نفوذناپذیر درنظر گرفته و شبکه جریان را در لایه خاک بالایی با نفوذپذیری بیشتر ترسیم نماییم.
۴) بدون تغییر در وضعیت موجود، با استفاده از آزمون و خطا، شبکه جریان را رسم کنیم.

پاسخ تست‌های فصل چهارم

۱- (۳)

نقاط B و C را در ابتدا و انتهای لایهٔ خاک در نظر بگیرید. در این حالت با توجه به لوله‌های متصل به این دو نقطه، می‌توان فشار آب حفره‌ای آنها را به‌دست آورد:

$\frac{P}{\gamma_w}$ (ناشی از فشار ۱۰ kPa در بالای مخزن)



$$B : h_{p_B} = (۱+۰/۴-۰/۷۵) + \frac{۱۰}{۱۰} = ۱/۶۵\ m$$

فاصلهٔ B تا سطح آب در مخزن سمت چپ

$$\Rightarrow\ u_B = h_{p_B}\gamma_w = ۱/۶۵\times ۱۰ = ۱۶/۵\ kPa$$

$$C : h_{p_C} = (۰/۵-۰/۷۵) = -۰/۲۵\,m \ \Rightarrow\ u_C = h_{p_C}\gamma_w = -۰/۲۵\times ۱۰ = -۲/۵\ kPa$$

توجه کنید که علت منفی به‌دست آمدن فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ C آن است که این نقطه بالاتر از تراز پیزومتری خود (خروجی لوله به اتمسفر) قرار گرفته است. حال مشابه تمرین (۳) و با توجه به خطی بودن تغییرات فشار آب حفره‌ای در این لایه خاک، u_A برابر می‌شود با:

$$u_A = \frac{u_B + u_C}{۲} = \frac{۱۶/۵ + (-۲/۵)}{۲} = ۷\ kPa$$

در وسط لایهٔ خاک است

۲- (۴)

برای محاسبهٔ گرادیان هیدرولیکی در رس قرار گرفته در زیر گودال، باید اختلاف هد کل بین بالا و پایین این لایه را داشته باشیم. می‌دانیم اختلاف تراز پیزومتری در دو سر یک لایه خاک، همان $\Delta H_{کل}$ می‌باشد. در این سؤال تراز پیزومتری برای نقطهٔ واقع در پایین خاک رس، سطح آب در سمت راست دیوار و تراز پیزومتری برای نقطهٔ واقع در بالای خاک رس، همان سطح خاک رس است. پس با توجه به شکل اختلاف این دو سطح برابر می‌شود با:

$$\Delta H_{کل} = \text{اختلاف تراز پیزومتری در دو سر خاک رس} = ۶\ m$$

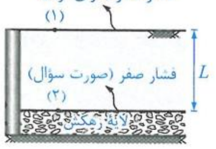
و در نهایت گرادیان هیدرولیکی در این لایه خاک به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$i = \frac{\Delta H_{کل}}{L} = \frac{۶}{۴} = ۱/۵$$

توجه کنید که تراز آب در گودال، تراز پیزومتری نقطهٔ بالایی خاک رس به حساب نمی‌آید، چرا که طبق صورت سؤال، گودال عایق‌بندی شده است.

۳- (۲)

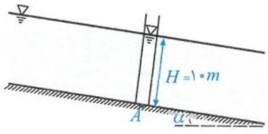
این تست کاملاً شبیه تمرین (۵) در متن درس است. بنابراین به طریق مشابه می‌نویسیم:



$$\begin{cases} H_۱ = \frac{u_۱}{\gamma_w} + h_{z_۱} = ۰ + L = L \\ H_۲ = \frac{u_۲}{\gamma_w} + h_{z_۲} = ۰ + ۰ = ۰ \end{cases} \Rightarrow\ i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{L-۰}{L} = ۱$$

۴- (۴)

مشابه با تمرین (۶) در متن درس، اگر یک پیزومتر در نقطهٔ A در نظر بگیریم، در آن‌صورت با توجه به ارتفاع آب در پیزومتر می‌نویسیم:



$$h_{p_A} = \text{تصویر ارتفاع آب در پیزومتر روی راستای قائم} = ۱۰\cos\alpha = ۱۰\times ۰/۹ = ۹\ m$$

$H = ۱۰\ m$

$$\Rightarrow\ u_A = h_{p_A}\gamma_w = ۹\times ۱۰ = ۹۰\ kPa$$

۵- (۲)

ابتدا سرعت ظاهری (متوسط) حرکت آب در خاک را با کمک رابطهٔ دبی، تعیین می‌کنیم:

$$Q = V\underbrace{A}_{\frac{\pi D^2}{4}} \Rightarrow 314 = V \times (\frac{3/14 \times 10^2}{4}) \Rightarrow V = 4\,cm/min$$

سپس همانطور که در قسمت دوم این فصل گفته شد، رابطهٔ سرعت تراوش (V_s) با سرعت ظاهری (V) به‌صورت زیر می‌باشد که از آنجا می‌توان V_s را به‌سادگی محاسبه کرد:

$$\begin{cases} V_s = \dfrac{V}{n} \\ n = \dfrac{e}{1+e} = \dfrac{1}{1+1} = 0/5 \end{cases} \Rightarrow V_s = \frac{4}{0/5} = 8\,cm/min$$

در ادامه برای محاسبهٔ ضریب نفوذپذیری نمونه، رابطهٔ دارسی یعنی $V = ki$ را در نظر گرفته و ابتدا i را می‌یابیم:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{50}{25} = 2$$

و در نهایت مقدار ضریب نفوذپذیری خاک را به‌صورت مقابل به‌دست می‌آوریم:

$$V = ki \Rightarrow 4 = k \times 2 \Rightarrow k = 2\,cm/min$$

۶- (۴)

در تمرین (۶) در متن درس دیدیم که برای یک لایهٔ شیب‌دار (مشابه این سؤال)، در نهایت گرادیان هیدرولیکی برابر می‌شود با:

$$i = \sin\alpha = \sin 10^\circ$$

حال با دانستن این موضوع مقدار دبی عبوری از لایهٔ خاک را محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{cases} Q = VA = kiA \\ A = \text{سطح عمود بر راستای جریان} = \underbrace{1}_{\text{در واحد عرض}} \times 5\cos 10^\circ = 5\cos 10^\circ \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q = (4 \times 10^{-3}) \times \sin 10^\circ \times 5\cos 10^\circ = 20\sin 10^\circ \cos 10^\circ \times 10^{-3}\,\frac{m^3/s}{m} = 20\sin 10^\circ \cos 10^\circ\,\frac{lit/s}{m}$$

و در نهایت می‌توان نتیجهٔ به‌دست آمده را به‌صورت زیر نیز نوشت:

$$\begin{cases} Q = 10 \times 2\sin 10^\circ \cos 10^\circ \\ 2\sin\alpha\cos\alpha = \sin 2\alpha \end{cases} \Rightarrow Q = 10\sin 20^\circ\,lit/s.m$$

۷- (۴)

ابتدا با توجه به مقدار داده شده برای دبی، گرادیان هیدرولیکی در خاک را به‌دست می‌آوریم:

$$Q = VA = kiA \Rightarrow 3\sqrt{3} = (0/05 \times \underbrace{10^{-2}}_{\text{تبدیل } cm/s \text{ به } m/s} \times \overbrace{3600}^{\text{تبدیل ثانیه به ساعت}}) \times i \times (5\cos 30 \times \underbrace{1}_{\text{واحد عرض}}) \Rightarrow i = \frac{2}{3}$$

سپس با در نظر گرفتن دو نقطهٔ مربوط به محل نصب پیزومترها می‌توان نوشت:

$$i = \frac{\overbrace{\Delta H}^{\text{افت انرژی بین دو نقطه (فاصلهٔ قائم سطح پیزومترها)}}}{L} = \frac{\Delta h_p + \Delta h_z}{L} \Rightarrow \frac{2}{3} = \frac{h\cos 30 + 30\sin 30}{30} \Rightarrow h = \frac{10}{\sqrt{3}}\,m$$

توجه کنید چون جریان آب بین دو لایهٔ نفوذناپذیر محبوس شده است، نمی‌توان مثل تست قبل از رابطهٔ $i = \sin\alpha$ استفاده نمود.

۸- (۳)

امتداد 30° نسبت به محور y ها، همان امتداد $\alpha = 60^\circ$ نسبت به محور x ها است، بنابراین می‌نویسیم:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{\cos^2\alpha}{k_x} + \frac{\sin^2\alpha}{k_y} = \frac{(\frac{1}{2})^2}{k_x} + \frac{(\frac{\sqrt{3}}{2})^2}{\frac{1}{3}k_x} = \frac{10}{4k_x} \Rightarrow k_s = 0/4\,k_x$$

۹- (۴)

اگر نفوذپذیری‌های دو جهت عمود بر هم را به‌ترتیب k_1 و k_2 نامیده و رابطهٔ آنها را به‌صورت $k_1 = 2k_2$ (یعنی امتداد (۱) نفوذپذیری بیشتری دارد)، در نظر بگیریم، در آن‌صورت نفوذپذیری معادل برابر می‌شود با:

$$k_e = \sqrt{k_1 k_2} = \sqrt{k_1 \times \frac{k_1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} k_1$$

۱۰- (۲)

ابتدا با توجه به شکل و ترازهای پیزومتری نشان داده شده، نتایج زیر را بیان می‌کنیم:

- افت هد کل در طول خاک‌ها برابر $\Delta H_{\text{کل}} = 50\,cm$ است.
- افت هد ناشی از جریان آب در خاک (۱)، $\Delta h_1 = 30\,cm$ می‌باشد.
- افت هد ناشی از جریان آب در خاک (۲)، برابر می‌شود با:

$$\Delta h_2 = \Delta H_{\text{کل}} - \Delta h_1 = 50 - 30 = 20\,cm$$

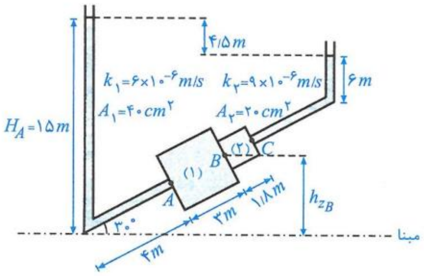
در ادامه چون خاک‌های (۱) و (۲) سری هستند، طبق مطالب خوانده شده در متن درس می‌نویسیم:

$$Q = kA\left(\frac{\Delta h}{L}\right) \Rightarrow \Delta h = \underbrace{Q}_{\text{در خاک‌های سری ثابت است}}\left(\frac{L}{Ak}\right) \Rightarrow \Delta h \propto \frac{L}{Ak} \Rightarrow \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = \frac{\left(\frac{L}{Ak}\right)_1}{\left(\frac{L}{Ak}\right)_2} \Rightarrow \frac{30}{20} = \frac{\left(\frac{25}{A \times 5 \times 10^{-4}}\right)}{\left(\frac{30}{A \times k_2}\right)}$$

$$\Rightarrow k_2 = 9 \times 10^{-4}\ cm/min$$

۱۱- (۴)

ابتدا تراز مبنا را مطابق شکل انتخاب کرده و سپس رابطهٔ برنولی را بین نقاط A و B می‌نویسیم:



$$H_A = H_B + \Delta H_{AB}$$

$H_A =$ فاصلهٔ تراز آبِ پیزومتر نصب شده در نقطهٔ A تا تراز مبنا $= 15\,m$

$H_B = ?$ (نامعلوم)

در ادامه با توجه به سری بودن خاک‌های (۱) و (۲)، ΔH_{AB} را که همان Δh_1 است به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$\begin{cases} \Delta h_1 = \dfrac{\left(\frac{L}{kA}\right)_1}{\sum\left(\frac{L}{kA}\right)_i} \Delta H_{\text{کل}} \quad , \quad \Delta H_{\text{کل}} = 4/5\,m \\ \text{لایهٔ (۱)} : \left(\frac{L}{kA}\right)_1 = \dfrac{3}{6 \times 10^{-6} \times 40} = 1/25 \times 10^4 \qquad \Rightarrow \Delta h_1 = \dfrac{1/25 \times 10^4}{1/25 \times 10^4 + 10^4} \times 4/5 = 2/5\,m \\ \text{لایهٔ (۲)} : \left(\frac{L}{kA}\right)_2 = \dfrac{1/8}{9 \times 10^{-6} \times 20} = 10^4 \end{cases}$$

حال مقدار H_B برابر می‌شود با:

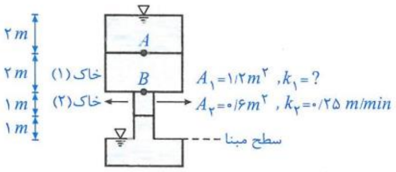
$$H_A = H_B + \underbrace{\Delta H_{AB}}_{\Delta h_1} \Rightarrow 15 = H_B + 2/5 \Rightarrow H_B = 12/5\,m$$

و در نهایت می‌توان مقدار هد فشار و از آنجا فشار آب حفره‌ای در این نقطه را به‌دست آورد:

$$H_B = h_{p_B} + h_{z_B} \Rightarrow 12/5 = h_{p_B} + 7 \times \sin 30^\circ \Rightarrow h_{p_B} = 9\,m \Rightarrow u_B = h_{p_B}\gamma_w = 9 \times 10 = 90\,kN/m^2$$

۱۲- (۲)

تراز مبنا را روی سطح آب در پایین دست انتخاب کرده و با نوشتن رابطهٔ برنولی بین نقاط A و B از این خاک، خواهیم داشت:



$$H_A = H_B + \underbrace{\Delta H_{AB}}_{\Delta H_{AB}=\Delta h_۱} \Rightarrow h_{z_A} + h_{p_A} = h_{z_B} + h_{p_B} + \Delta h_۱$$

$$\xrightarrow[h_{p_A}=h_{p_B}]{\text{در طول خاک (۱) ثابت است } h_p} ۴ = ۲ + \Delta h_۱ \Rightarrow \Delta h_۱ = ۲m$$

$$\Rightarrow \Delta h_۲ = \Delta H_{\text{کل}} - \Delta h_۱ = ۶ - ۲ = ۴\ m$$

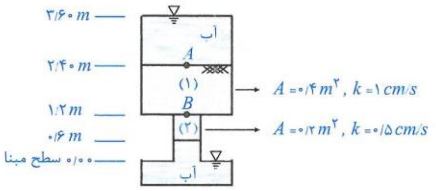
حال با توجه به سری بودن خاک‌ها، مشابه با تست (۱۰) می‌نویسیم:

$$\Delta h \propto \frac{L}{Ak} \Rightarrow \frac{\Delta h_۲}{\Delta h_۱} = \frac{(\frac{L}{Ak})_۲}{(\frac{L}{Ak})_۱} \Rightarrow \frac{۴}{۲} = \frac{(\frac{۱}{۰/۶\times ۰/۲۵})}{(\frac{۲}{۱/۲\times k_۱})} \Rightarrow k_۱ = ۰/۵\ m/min$$

۱۳- (۲)

ابتدا نقاط A و B را مطابق شکل زیر در نظر گرفته و رابطهٔ برنولی را بین این دو نقطه می‌نویسیم: $H_A = H_B + \Delta H_{AB}$

سپس تراز مبنا را بر روی سطح آب در پایین دست در نظر گرفته و H_A، H_B و ΔH_{AB} (که همان $\Delta h_۱$ است) را به‌دست می‌آوریم.



$H_A =$ فاصلهٔ تراز پیزومتریِ نقطهٔ A تا تراز مبنا $= ۳/۶\ m$

$H_B = ?$ (نامعلوم)

در ادامه با توجه به اینکه خاک‌های (۱) و (۲) سری هستند، می‌توان $\Delta h_۱$ را به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} \Delta h_۱ = \dfrac{(\frac{L}{kA})_۱}{\sum(\frac{L}{kA})_i}\Delta H_{\text{کل}} \quad , \quad \Delta H_{\text{کل}} = ۳/۶\ m \\ \text{خاک (۱)}: (\frac{L}{kA})_۱ = \frac{۱/۲}{۱\times ۰/۴} = ۳ \\ \text{خاک (۲)}: (\frac{L}{kA})_۲ = \frac{۰/۶}{۰/۵\times ۰/۲} = ۶ \end{cases} \Rightarrow \Delta h_۱ = \frac{۳}{۳+۶}\times ۳/۶ = ۱/۲\ m$$

در نهایت H_B و از آنجا h_{p_B} و u_B به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$H_A = H_B + \underbrace{\Delta H_{AB}}_{\Delta h_۱} \Rightarrow ۳/۶ = H_B + ۱/۲ \Rightarrow H_B = ۲/۴\ m$$

$$H_B = h_{p_B} + h_{z_B} \Rightarrow ۲/۴ = h_{p_B} + ۱/۲ \Rightarrow h_{p_B} = ۱/۲m$$

$$u_B = h_{p_B}\gamma_w = ۱/۲\times ۱۰ = ۱۲\ kPa$$

۱۴- (۱)

ارتفاع h، اختلاف تراز پیزومتری بین دو سر خاک (۱) است و همان $\Delta h_۱$ می‌باشد. حال با توجه به سری بودن لایه‌های خاک (۱) و (۲) مشابه با تمرین‌های (۱۰) و (۱۱) در متن درس، می‌نویسیم:

$$\text{نسبت } \frac{L}{Ak} \begin{cases} \text{لایهٔ (۱)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_۱ = \frac{۱۵۰}{A\times ۳k_۲} = \frac{۵۰}{Ak_۲} = x \\ \text{لایهٔ (۲)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_۲ = \frac{۱۵۰}{A\times k_۲} = \frac{۱۵۰}{Ak_۲} = ۳x \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta h_۱ = (\frac{x}{x+۳x})\Delta H_{\text{کل}} = \frac{۱}{۴}\times ۴۰۰ = ۱۰۰\ mm$$

(۴) -۱۵

می‌دانیم به هنگام جریان آب در لایه‌های موازیِ خاک، $\Delta h_1 = \Delta h_2$ بوده و با توجه به یکسان بودن طول لایه‌ها $i_1 = i_2$ می‌باشد. همچنین با توجه به رابطهٔ دارسی می‌توان گفت:

$$V = ki \xrightarrow[k_1 > k_2]{i_1 = i_2} V_1 > V_2$$

(۳) -۱۶

رابطهٔ دبی را در نظر بگیرید:

$$Q = VA = kiA = kA\left(\frac{\Delta H}{L}\right)$$

در نمونه‌های (۱) و (۲)، ΔH ،L و A یکی بوده و فقط نفوذپذیری خاک‌ها با هم متفاوت است، بنابراین برای محاسبهٔ نسبت $\frac{Q_1}{Q_2}$ باید k_{e_1} و k_{e_2} (نفوذپذیری‌های معادل نمونه‌ها) را به‌دست آوریم:

- نمونهٔ (۱): در این شکل دو لایه خاک به‌صورت سری قرار گرفته‌اند، بنابراین k_e برابر می‌شود با:

$$k_{e_1} = \frac{\left(\frac{L}{A}\right)_{\text{کل}}}{\sum\left(\frac{L}{kA}\right)_i} = \frac{\frac{2L}{A}}{\frac{L}{kA} + \frac{L}{2kA}} = \frac{4}{3}k$$

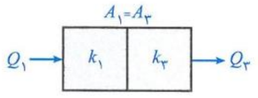
- نمونهٔ (۲): در این حالت چون لایه‌های خاک موازی هستند، بنابراین k_e برابر است با:

$$k_{e_2} = \frac{\sum(kH)_i}{H} = \frac{k \times L + 2k \times L}{2L} = 1/5\,k$$

حال می‌توانیم به‌سادگی نسبت دبی‌ها را در دو شکل مشخص کنیم:

$$Q = VA = kiA = k\frac{\Delta H}{L}A \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\left(k_e \frac{\Delta H}{L} A\right)_1}{\left(k_e \frac{\Delta H}{L} A\right)_2} = \frac{k_{e_1}}{k_{e_2}} = \frac{\frac{4}{3}k}{1/5\,k} = \frac{8}{9}$$

(۱) -۱۷



خاک‌های (۱) و (۲) با هم موازی‌اند، بنابراین $i_1 = i_2$ می‌باشد. از طرفی چون $k_1 = k_2$ است، می‌توان کل لایهٔ مربوط به خاک‌های (۱) و (۲) را با یک خاک با نفوذپذیری k_1 (یا k_2) جایگزین نمود. در این‌صورت شکل مقابل به‌دست می‌آید و می‌توان طبق خصوصیات خاک‌های سری نوشت:

$$Q_1 = Q_3 \xrightarrow{Q = kiA} k_1 i_1 A_1 = k_3 i_3 A_3 \xrightarrow[k_1 < k_3]{A_1 = A_3} i_1 > i_3$$

در نهایت رابطهٔ گرادیان‌های هیدرولیکی در این سه لایه خاک به‌صورت $i_1 = i_2 > i_3$ خواهد بود.

(۲) -۱۸

مشابه با تمرین (۱۷) در متن درس، نفوذپذیری معادل در امتدادهای افقی و قائم را به‌دست می‌آوریم:

$$k_{x(e)} = \frac{\sum(k_x H)_i}{\sum H_i} = \frac{k_1 H_1 + k_2 H_2}{H_1 + H_2} = \frac{8 \times 10^{-4} \times 6 + 5 \times 10^{-3} \times 3}{6 + 3} = 22 \times 10^{-4}\,cm/s$$

$$k_{z(e)} = \frac{\sum H_i}{\sum\left(\frac{H}{k_z}\right)_i} = \frac{6 + 3}{\frac{6}{8 \times 10^{-4}} + \frac{3}{5 \times 10^{-3}}} \simeq 11 \times 10^{-4}\,cm/s$$

در نهایت نسبت خواسته شده برابر می‌شود با:

$$\frac{k_{x(e)}}{k_{z(e)}} = \frac{22 \times 10^{-4}}{11 \times 10^{-4}} = 2$$

۱۹- (۳)

ابتدا ضریب نفوذپذیری معادل در راستای افقی و قائم را برای شکل داده شده می‌یابیم:

$$k_{x(e)}=\frac{\sum(k_x H)_i}{\sum H_i}=\frac{k\times L+۲k\times L}{L+L}=\frac{۳}{۲}k$$

$$k_{z(e)}=\frac{\sum H_i}{\sum(\frac{H}{k_z})_i}=\frac{L+L}{\frac{L}{۲k}+\frac{L}{۴k}}=\frac{۸}{۳}k$$

حال نفوذپذیری معادل برای کل مجموعه را به‌صورت مقابل محاسبه می‌کنیم:

$$k_e=\sqrt{k_{x(e)}k_{z(e)}}=\sqrt{\frac{۳}{۲}k\times\frac{۸}{۳}k}=۲k$$

۲۰- (۱)

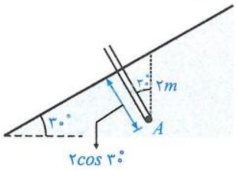
اگر تعداد خطوط جریان را دو برابر کنیم، برای مربعی باقی ماندن چشمه‌های جریان لازم است تا تعداد خطوط هم پتانسیل نیز دو برابر شود، بنابراین دبی عبوری هیچ تغییری نمی‌کند.

$$q=k\,\Delta H\,\frac{N_f\ (\text{دو برابر})}{N_d\ (\text{دو برابر})}\Rightarrow q\ \text{ثابت می‌ماند}$$

توجه: شاید از اول هم واضح بود که دبی عبوری از زیر یک سد در طبیعت، ربطی به ترسیم شبکهٔ جریان توسط ما ندارد!

۲۱- (۲)

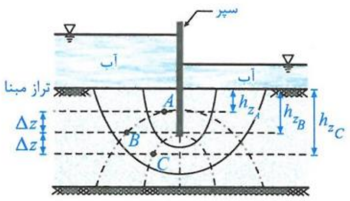
همانطور که در تست (۳) نیز دیدیم، فشار آب حفره‌ای در هر نقطه از یک لایه خاک شیبدار به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:



$$h_{p_A}=\text{تصویر}\ \underbrace{\text{ارتفاع آب در پیزومتر}}_{۲\cos ۳۰°}\ \text{روی راستای قائم}=۲\cos ۳۰\times\cos ۳۰°=۲\times\frac{\sqrt{۳}}{۲}\times\frac{\sqrt{۳}}{۲}=۱/۵\,m$$

$$\Rightarrow u_A=h_{p_A}\gamma_w=۱/۵\times ۱۰=۱۵\,kN/m^۲$$

۲۲- (۲)



نقاط A و B روی یک منحنی هم پتانسیل هستند، پس $H_A=H_B$ می‌باشد و می‌توان نوشت:

$$\begin{cases}H_A=H_B\Rightarrow h_{p_A}+h_{z_A}=h_{p_B}+h_{z_B}\\ h_{z_A}=h_{z_B}+\Delta z>h_{z_B}\end{cases}\Rightarrow h_{p_A}<h_{p_B}\Rightarrow u_A<u_B$$

همچنین رابطهٔ برنولی بین نقاط B و C به شکل زیر است:

$$\begin{cases}H_B=H_C+\Delta H_{BC}\\ \Delta H_{BC}=\Delta h\ (\text{افت انرژی ناشی از یک پله})\end{cases}\Rightarrow h_{p_B}+h_{z_B}=h_{p_C}+h_{z_C}+\Delta h$$

حال با توجه به شکل و دقت به این موضوع که کلیهٔ h_zها منفی هستند، می‌توان نوشت:

$$h_{z_B}-h_{z_C}=\Delta z\Rightarrow h_{p_B}+(\Delta z+h_{z_C})=h_{p_C}+h_{z_C}+\Delta h\Rightarrow h_{p_B}=h_{p_C}+(\Delta h-\Delta z)$$

چون $\Delta h>\Delta z$ است، بنابراین عبارت $(\Delta h-\Delta z)$ در سمت راست تساوی فوق، مقداری مثبت بوده و در نتیجه $h_{p_C}<h_{p_B}$ خواهد شد. پس $u_C<u_B$ است و این یعنی فشار آب حفره‌ای در B بیشتر از دو نقطهٔ دیگر خواهد بود.

۲۳- (۱)

نقاط A و B مثل نقاط C و D روی یک خط هم‌پتانسیل قرار دارند، بنابراین می‌توان نوشت:

$$H_A=H_B\Rightarrow h_{p_A}+h_{z_A}=h_{p_B}+h_{z_B}\xrightarrow{h_{z_B}>h_{z_A}}h_{p_A}>h_{p_B}\Rightarrow u_A>u_B$$

$$H_C=H_D\xrightarrow{\text{به طریق مشابه}}u_D>u_C$$

از طرفی نقاط A و B روی خط پتانسیل دوم و نقاط C و D روی خط پتانسیل ششم واقع شده‌اند، بنابراین بار آبی کل برای نقاط A و B بیشتر از نقاط C و D است و خواهیم داشت:

$$H_B > H_C \xrightarrow{h_{z_B} = h_{z_D}} u_B > u_C$$

$$H_A > H_D \xrightarrow{h_{z_A} = h_{z_D}} u_A > u_D$$

حال باتوجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت:

$$u_A > u_B > u_C \quad , \quad u_A > u_D > u_C$$

۲۴- (۳)

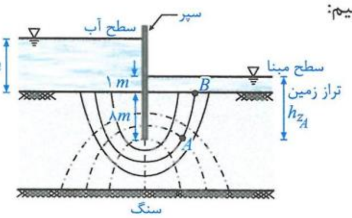
می‌دانیم اختلاف سطح آب در پیزومترهای نصب شده در دو نقطه از یک خاک، بیانگر ΔH یا افت هد کل بین آن دو نقطه است. در این سؤال نقاط A و B روی یک منحنی هم‌پتانسیل قرار دارند، پس $H_A = H_B$ بوده و در نتیجه $\Delta H = ۰$ است.

۲۵- (۴)

ابتدا در پاسخ به قسمت اول این تست، دبی جریان را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$Q = k\,\Delta H \left(\frac{N_f}{N_d}\right) B = ۱\times ۱۰^{-۵} \times (۹-۱)\times \frac{۴}{۸}\times ۲۰ = ۸\times ۱۰^{-۴}\ m^۳/s$$

در ادامه برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A، مشابه تمرین (۲۲) عمل کرده و می‌نویسیم:



۱- سطح آب در پایین‌دست را به‌عنوان سطح مبنا انتخاب می‌کنیم.

۲- با توجه به شکل، $h_{z_A} = -۹\ m$ است.

۳- در فرآیند محاسبهٔ H_A ملاحظه می‌کنید که برای رسیدن از نقطهٔ A به سطح زمین در پایین‌دست (سمت راست سپر)، باید دو پله از افت‌های پتانسیل را بگذرانیم، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} H_A - ۲\Delta h = H_B \\ H_B = \text{فاصلهٔ تراز پیزومتری } B \text{ تا سطح مبنا} = ۰ \\ \boxed{\Delta h} = \dfrac{\Delta H_{\text{کل}}}{N_d} = \dfrac{(۹-۱)}{۸} = ۱\ m \end{cases} \Rightarrow H_A - ۲\times ۱ = ۰ \Rightarrow H_A = ۲\ m$$

افت ناشی از هر پله

۴- فشار آب حفره‌ای در A به‌ترتیب زیر به‌دست می‌آید:

$$H_A = h_{z_A} + h_{p_A} \Rightarrow ۲ = -۹ + h_{p_A} \Rightarrow h_{p_A} = ۱۱m \Rightarrow u_A = h_{p_A}\gamma_w = ۱۱\times ۱۰ = ۱۱۰\ kPa$$

۲۶- (۱)

در شکل داده شده تعداد کانال‌های جریان (N_f) و افت‌های پتانسیل (N_d) طبق اطلاعات داده شده در صورت سؤال به شرح زیر است.

$$N_f = ۴/۵ \quad , \quad N_d = ۱۵$$

بنابراین دبی عبوری از زیر این سازه در واحد طول آن برابر است با:

$$q = k\,\Delta H \left(\frac{N_f}{N_d}\right) = ۲/۵\times ۱۰^{-۵} \times (۵-۱)\times \frac{۴/۵}{۱۵} = ۳\times ۱۰^{-۵}\ m^۳/s$$

پس گزینهٔ (۲) غلط بوده و گزینهٔ (۱) پاسخ این تست است.

علت غلط بودن گزینه‌های (۳) و (۴) را با به‌دست آوردن اختلاف سطح پیزومتریک (تراز پیزومتری) نقطهٔ A و بالا دست، مشخص می‌کنیم به این ترتیب که می‌گوییم اختلاف سطح پیزومتریک در دو نقطه از خاک، بیانگر افت انرژی بین آن دو نقطه است، بنابراین افت انرژی از بالا دست خاک تا نقطهٔ A معادل افت ناشی از ۳ پله می‌باشد و برابر است با:

$$\Delta H = ۳\Delta h = ۳\times \frac{\Delta H_{\text{کل}}}{N_d} = ۳\times \frac{(۵-۱)}{۱۵} = ۰/۸\ m$$

۲۷- (۳)

دبی ورودی به ناحیهٔ گودبرداری شده از جانب هر یک از شبکه‌های جریان برابر است با:

$$\begin{cases} Q = k\,\Delta H\,(\dfrac{N_f}{N_d})\,B \\ N_f = 3 \ , \ N_d = 9 \end{cases} \Rightarrow Q = 2.5\times10^{-5}\times(2.5+2)\times\frac{3}{9}\times 20 = 7.5\times10^{-4}\ m^3/s$$

حال چون دو شبکهٔ جریان داریم (سمت راست و چپ)، در نتیجه کل دبی ورودی به ناحیهٔ گودبرداری برابر می‌شود با:

$$Q_{\text{کل}} = 2Q = 2\times 7.5\times10^{-4} = 15\times10^{-4} \quad \text{یا} \quad 1.5\times10^{-3}\ m^3/s$$

۲۸- (۱)

رابطهٔ $i = \dfrac{\Delta H}{L}$ را در نظر بگیرید. افت انرژی بین دو نقطهٔ A و B، برابر Δh (افت ناشی از یک پله افت پتانسیل) می‌باشد که به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\Delta H_{AB} = \Delta h = \frac{\Delta H_{\text{کل}}}{N_d} = \frac{(10-2)}{8} = 1\,m$$

بنابراین گرادیان هیدرولیکی بین این دو نقطه برابر است با:

$$i = \frac{\Delta H_{AB}}{L_{AB}} = \frac{1}{3}$$

۲۹- (۴)

ابتدا سرعت ظاهری جریان در نقطهٔ A را با استفاده از رابطهٔ دارسی، به‌صورت زیر می‌یابیم:

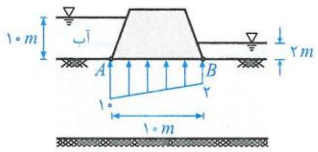
$$\begin{cases} V = ki \\ i = \dfrac{\Delta h}{L} = \dfrac{(\frac{\Delta H_{\text{کل}}}{N_d})}{L} = \dfrac{(\frac{80-5}{15})}{10} = 0.5 \end{cases} \Rightarrow V = 8\times10^{-4}\times0.5 = 4\times10^{-4}\ m/s$$

حال در ادامه سرعت واقعی (سرعت تراوش یا V_s) به‌صورت مقابل محاسبه می‌شود:

$$V_s = \frac{V}{n} = \frac{4\times10^{-4}}{0.5} = 8\times10^{-4}\ m/s = 0.08\,cm/s$$

۳۰- (۳)

برای محاسبهٔ نیروی *uplift*، کافیست فشار آب حفره‌ای در نقاط ابتدا و انتهای زیر سد را بیابیم.



$$u_A = h_{p_A}\,\gamma_w = 10\times1 = 10\,t/m^2$$

$\gamma_w = 1\,t/m^3$

$$u_B = h_{p_B}\,\gamma_w = 2\times1 = 2\,t/m^2$$

بنابراین توزیع فشار در زیر سد مطابق شکل فوق خواهد بود و در نتیجه نیروی *uplift* برابر است با:

$$F_{uplift} = (\frac{u_A + u_B}{2})\times 10\times 1 = (\frac{10+2}{2})\times10\times1 = 60\,ton$$

(۱: طول عمود بر صفحه)

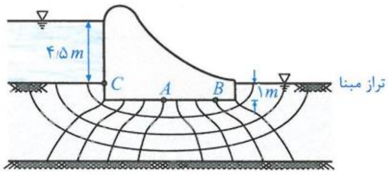
۳۱- (۳)

همانطور که ملاحظه می‌کنید هیچگونه اختلاف تراز پیزومتری در شکل دیده نمی‌شود. این امر منطقی است زیرا نفوذپذیری لایهٔ آبرفتی بالا بوده و اگر هم قبلاً اختلاف ترازی وجود داشته، با حرکت سریع آب، از بین رفته و تمام سطوح آب هم‌تراز گشته‌اند. نتیجه آنکه در وضعیت نشان داده شده در شکل آب هیچگونه حرکتی در خاک ندارد. از این رو برای محاسبه فشار آب حفره‌ای (فشار *uplift* در زیر سازه) خواهیم داشت:

$$u = \gamma_w . h_p = \gamma_w\,H_0 = 1000\times(3+1) = 4000\ kg/m^2$$

۳۲- (۲)

برای حل این سؤال، سطح زمین در پایین دست را به‌عنوان تراز مبنا در نظر می‌گیریم که در این صورت $h_{z_A} = h_{z_B} = -1\,m$ می‌شود. حال هد کل این دو نقطه را به‌ترتیب زیر به‌دست می‌آوریم:



$$H_A = H_C - \boxed{۴}\ \boxed{\Delta h} = ۴/۵ - ۴ \times \frac{۴/۵}{۹} = ۲/۵\,m$$

(از C تا A، ۴ پله افت داریم؛ $\Delta h = \frac{\Delta H_{کل}}{N_d}$)

$$H_B = H_C - \boxed{۷}\ \Delta h = ۴/۵ - ۷ \times \frac{۴/۵}{۹} = ۱\,m$$

(از C تا B، ۷ پله افت داریم)

و در نهایت هد فشار و از آنجا فشار آب حفره‌ای (فشار *uplift*) در نقاط A و B به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$H_A = h_{p_A} + h_{z_A} \Rightarrow ۲/۵ = h_{p_A} + (-۱) \Rightarrow h_{p_A} = ۳/۵\,m \Rightarrow u_A = h_{p_A}\,\gamma_w = ۳/۵ \times ۱۰۰۰ = ۳۵۰۰\,kg/m^۲$$

$$H_B = h_{p_B} + h_{z_B} \Rightarrow ۱ = h_{p_B} + (-۱) \Rightarrow h_{p_B} = ۲\,m \Rightarrow u_B = h_{p_B}\,\gamma_w = ۲ \times ۱۰۰۰ = ۲۰۰۰\,kg/m^۲$$

۳۳- (۱)

رابطهٔ بین هد کل در این دو نقطه به‌صورت زیر می‌باشد:

$$H_B = H_A - \boxed{۳}\ \boxed{\Delta h} \Rightarrow H_B = H_A - ۳ \times \frac{۳۵}{۷} = H_A - ۱۵$$

(از A تا B، ۳ پله افت داریم؛ $\Delta h = \frac{\Delta H_{کل}}{N_d}$)

همچنین نقاط A و B روی سطح تراوش (که به آن خط نشت می‌گویند) قرار داشته و در نتیجه $h_{p_A} = h_{p_B} = ۰$ است، بنابراین می‌نویسیم:

$$H_B = H_A - ۱۵ \Rightarrow h_{z_B} + \cancel{h_{p_B}}^{۰} = h_{z_A} + \cancel{h_{p_A}}^{۰} - ۱۵ \Rightarrow h_{z_A} - h_{z_B} = ۱۵\,m$$

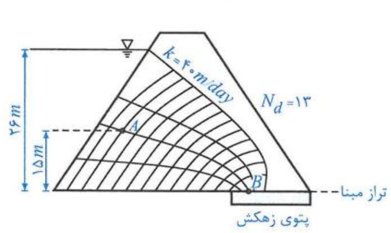
توجه: موضوع مربوط به این تست، با جزئیات بیشتری در تمرین (۳۵) که مربوط به قسمت تکمیلی است، آورده شده است.

۳۴- (۴)

ابتدا برای پاسخ به قسمت اول این تست، دبی عبوری از بدنهٔ سد را می‌یابیم:

$$Q = k\,\Delta H\,(\frac{N_f}{N_d})\,B = ۴۰ \times ۲۶ \times \frac{۴}{۱۳} \times ۱۰۰ = ۳۲۰۰۰\,m^۳/day$$

حال در ادامه برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A، با در نظر گرفتن تراز مبنا در کف زمین و قرار دادن نقطهٔ B روی آن (مطابق شکل)، خواهیم داشت:



$$\begin{cases} H_B = H_A - \boxed{۱۱}\ \boxed{\Delta h} \\ H_B = \text{فاصلهٔ تراز پیزومتری } B \text{ تا تراز مبنا} = ۰ \end{cases}$$

(از A تا B، ۱۱ پله افت داریم؛ $\Delta h = \frac{\Delta H_{کل}}{N_d}$)

$$\Rightarrow H_A - ۱۱ \times \frac{۲۶}{۱۳} = ۰ \Rightarrow H_A = ۲۲\,m$$

$$H_A = h_{p_A} + h_{z_A} \xrightarrow{h_{z_A} = ۱۵\,m} ۲۲ = h_{p_A} + ۱۵ \Rightarrow h_{p_A} = ۷\,m$$

پس فشار آب حفره‌ای در A برابر می‌شود با:

$$u_A = h_{p_A}\,\gamma_w = ۷ \times ۱۰ = ۷۰\,kN/m^۲$$

۳۵- (۲)

با استفاده از رابطهٔ نفوذپذیری خاک در حالت کلی، خواهیم داشت:

$$k = \bar{k}\,(\frac{\gamma_w}{\mu_w}) \Rightarrow \frac{k_۲}{k_۱} = \frac{\gamma_{w_۲}}{\gamma_{w_۱}} \times \frac{\mu_۱}{\mu_۲} = ۰/۹ \times \frac{۱}{۰/۶} = ۱/۵$$

۳۶- (۲)

رابطهٔ هازن را در نظر بگیرید:

$$k = mD_{10}^2 \Rightarrow \frac{k_2}{k_1} = \left[\frac{D_{10(2)}}{D_{10(1)}}\right]^2$$

حال برای محاسبهٔ نسبت D_{10} در این دو خاک، طبق تعریف C_u می‌نویسیم:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \Rightarrow D_{10} = \frac{D_{60}}{C_u} \Rightarrow \frac{D_{10(2)}}{D_{10(1)}} = \frac{D_{60(2)}}{D_{60(1)}} \times \frac{C_{u_1}}{C_{u_2}}$$

طبق اطلاعات صورت سؤال، ٪۶۰ذرات هر دو خاک از $3\ mm$ کوچکترند، یعنی $D_{60(1)} = D_{60(2)} = 3\ mm$ بوده و $\frac{D_{60(2)}}{D_{60(1)}} = 1$ می‌باشد. پس می‌توان نوشت:

$$\frac{D_{10(2)}}{D_{10(1)}} = 1 \times \frac{6}{12} = 0/5 \Rightarrow \frac{k_2}{k_1} = 0/5^2 = \frac{1}{4}$$

۳۷- (۲)

می‌دانیم سرعت تراوش از رابطهٔ $V_s = \frac{V}{n}$ به‌دست می‌آید، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{V_{s_2}}{V_{s_1}} = \frac{V_2}{V_1} \times \frac{n_1}{n_2}$$

از طرفی با توجه به رابطه بین e و n که در فصل اول خواندیم، خواهیم داشت:

$$n = \frac{e}{1+e} \Rightarrow \begin{cases} n_1 = \frac{0/25}{1+0/25} = \frac{1}{5} \\ n_2 = \frac{0/5}{1+0/5} = \frac{1}{3} \end{cases}$$

همچنین با توجه به رابطهٔ آزمایش با بار آبی ثابت، نسبت سرعت جریان (منظور سرعت متوسط) آب در خاک‌ها به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = kA\left(\frac{\Delta H}{L}\right) \Rightarrow \underbrace{\frac{Q}{A}}_{V} = k\left(\frac{\Delta H}{L}\right) \Rightarrow V = k\left(\frac{\Delta H}{L}\right) \xrightarrow{\text{ثابت‌اند. } \Delta H \text{ و } L} \frac{V_2}{V_1} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{1}{4}$$

پس در نهایت نسبت سرعت تراوش در دو نمونه برابر است با:

$$\frac{V_{s_2}}{V_{s_1}} = \frac{V_2}{V_1} \times \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{4} \times \frac{\left(\frac{1}{5}\right)}{\left(\frac{1}{3}\right)} = 0/15$$

۳۸- (۱)

با استفاده از رابطهٔ $\frac{k_2}{k_1} = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1}$ که در بحث مربوط به شبکهٔ جریان در خاک‌های ناهمگن آن را دیدید، (در این رابطه θ امتداد جریـان آب نسبت به راستای قائم می‌باشد) می‌نویسیم:

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} \Rightarrow \frac{k}{3k} = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} \Rightarrow \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} = \frac{1}{3}$$

در خاک (۱) زاویه θ_1 مساوی صفر است، پس $\tan\theta_1 = 0$ بوده و در نتیجه θ_2 برابر می‌شود با:

$$\tan\theta_2 = \frac{1}{3}\tan\theta_1 = \frac{1}{3} \times 0 = 0 \Rightarrow \theta_2 = 0$$

۳۹- (۱)

با توجه به رابطهٔ $\frac{k_2}{k_1} = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1}$ می‌نویسیم:

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1} \Rightarrow \frac{k}{2k} = \frac{\tan\alpha}{\tan 60^\circ} \Rightarrow \tan\alpha = \frac{1}{2}\underbrace{\tan 60^\circ}_{\tan 60^\circ = \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

۴۰- (۳)

در خاکهای ناهمگن زمانی که نسبت نفوذپذیری لایه‌های مختلف از ۱۰ بیشتر شود، بهتر است شبکه جریان فقط برای لایه‌ای که نفوذپـذیری بیشتری دارد، ترسیم شود و لایه با نفوذپذیری کمتر نیز به‌صورت نفوذناپذیر درنظر گرفته شود.

در این سؤال داریم:

$$\frac{k_۱}{k_۲}=\frac{۲\times۱۰^{-۳}}{۵\times۱۰^{-۵}}=۴۰>۱۰$$

بنابراین شبکه جریان برای خاک (۱) ترسیم می‌شود و خاک (۲) را لایه نفوذناپذیر در نظر می‌گیریم.

فصل ۵: تنش مؤثر

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

در فصل قبل با مفاهیم اولیهٔ حرکت آب در خاک آشنا شدیم و نحوهٔ محاسبهٔ هدکل و فشار آب حفره‌ای در خاک را در حالت‌های یک بعدی و دو بعدی یاد گرفتیم. در این فصل می‌خواهیم شما را با کمیت جدیدی آشنا کنیم که نقش بسیار مهمی در محاسبات مربوط به مقاومت و نشست خاک دارد. این کمیت که ارتباط مستقیم با ساختار جامد خاک دارد، تنش مؤثر نامیده می‌شود و در واقع نماینده‌ای برای تنش تحمل شده توسط دانه‌های جامد (ساختار جامد) خاک است.

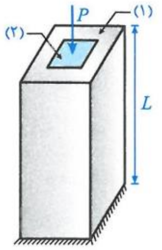
در این فصل موضوعات مربوط به تنش مؤثر را در قسمت‌های زیر به شما عزیزان آموزش می‌دهیم:

تنش مؤثر:

- قسمت اول: مفهوم تنش کل و تنش مؤثر
- قسمت دوم: بررسی حالت‌های خاص در محاسبهٔ تنش مؤثر
- قسمت سوم: کاربرد اصل تنش مؤثر در محاسبهٔ تنش مؤثرِ خاک‌های دارای تراوش
- قسمت چهارم: فشار تراوش و کاربرد آن در محاسبهٔ تنش مؤثرِ خاک‌های دارای تراوش
- قسمت پنجم: پایداری خاک‌ها در برابر جوشش و بالازدگی

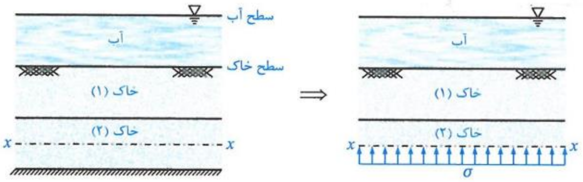
قسمت اول/ مفهوم تنش کل و تنش مؤثر

A-۱- مفاهیم اولیه



شکل مقابل را در نظر بگیرید که در آن، یک ستون مرکب تحت بار قائم P قرار گرفته است. این ستون از دو مادهٔ (۱) و (۲) تشکیل شده است که این دو ماده بار P را بین خود تقسیم می‌کنند، یعنی قسمتی از نیروی P توسط مادهٔ (۱) و قسمتی دیگر از آن توسط مادهٔ (۲) تحمل می‌شود و هر دو ماده در تحمل نیرو مشارکت دارند.

حال می‌خواهیم بحث فوق را به مکانیک خاک نیز تعمیم دهیم. برای این منظور، به پروفیل خاک زیر توجه کنید:

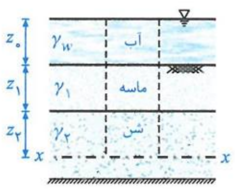


به‌طور کلی در هر عمقی از خاک، برای برقراری تعادل نیروها و خنثی کردن اثر وزن لایه‌های بالایی خاک، یک تنش σ ایجاد می‌شود که به آن **تنش کل** می‌گوییم. حال سؤال آن است که این تنش σ چگونه تحمل می‌شود؟

در جواب باید بگوییم که قسمتی از این تنش را دانه‌های جامد خاک تحمل می‌کنند که در مکانیک خاک آن را **تنش مؤثر** نامیده و با σ' نشان می‌دهند و قسمت دیگر نیز توسط ذرات آب تحمل می‌شود که در مکانیک خاک به آن **فشار آب حفره‌ای** (u) گفته می‌شود و در فصل قبل با نحوهٔ محاسبهٔ آن آشنا شدیم.

در ادامهٔ بحث، قصد داریم تا شما را با جزئیات بیشتری از تنش مؤثر آشنا کنیم.

A-۲- نحوهٔ محاسبهٔ تنش کل و تنش مؤثر در حالت بدون تراوش در خاک‌ها

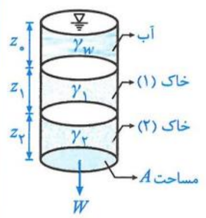


خاک اشباع شکل مقابل را در نظر بگیرید که در آن آب ساکن بوده و هیچگونه تراوشی نداریم:

در ادامه می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، تنش کل و تنش مؤثر در مقطع $(x-x)$ را به‌دست آوریم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: اگر در مقطع $(x-x)$ ستونی از خاک با سطح مقطع A را در نظر بگیریم، وزن لایه‌های بالای مقطع $(x-x)$ چقدر است؟



● پاسخ: می‌دانیم اگر وزن مخصوص ماده‌ای برابر γ و حجم آن برابر V باشد، در آن‌صورت وزن ماده برابر $W=\gamma V$ می‌شود. حال با این توضیح، برای محاسبهٔ وزن لایه‌های بالای مقطع $(x-x)$ به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

وزن ستون خاک = وزن ستون آب + وزن ستون خاک (۱) + وزن ستون خاک (۲) در بالای تراز $(x-x)$

$$W=(\gamma_w)(Az_0)+(\gamma_1)(Az_1)+(\gamma_2)(Az_2)=(A)[\gamma_w z_0+\gamma_1 z_1+\gamma_2 z_2]$$

زیر شاخه‌های قسمت اول

A-۱- مفاهیم اولیه

A-۲- نحوهٔ محاسبهٔ تنش کل و تنش مؤثر در حالت بدون تراوش در خاک‌ها

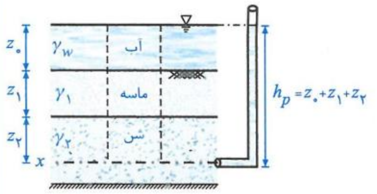
سؤال ۲: با محاسبهٔ وزن W ، حالا بگویید کل تنشی که باید در مقطع $(x-x)$ تحمل شود چقدر است؟

● پاسخ: برای محاسبهٔ تنش کل (σ) کافی است وزن لایه‌ها را بر مساحت A تقسیم کنیم که با این کار خواهیم داشت:

$$\sigma = \frac{W}{A} = \frac{(A)[\gamma_w z_0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2]}{A} = \gamma_w z_0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2$$

سؤال ۳: با توجه به ساکن بودن آب، هد فشار و فشار آب حفره‌ای (یا همان سهم آب از تنش کل σ) در مقطع $(x-x)$ چقدر است؟

● پاسخ: با توجه به ساکن بودن آب، با قرار دادن پیزومتر در مقطع $(x-x)$، آب تا سطح آزاد در آن بالا می‌رود و می‌توان نوشت:



$$u = \gamma_w h_p = \gamma_w (z_0 + z_1 + z_2)$$

سؤال ۴: پس از محاسبهٔ سهم آب از تنش کل σ، به نظر شما سهم دانه‌های جامد از تنش کل چقدر است؟

● پاسخ: با توجه به اینکه تنش کل بین آب و دانه‌های جامد تقسیم می‌شود، می‌توان گفت:

$$\sigma = \sigma' + u \Rightarrow \sigma' = \sigma - u$$

در ادامه با توجه به دانستن مقادیر σ و u از پاسخ سؤالات (۲) و (۳) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \sigma = \gamma_w z_0 + \gamma_1 z_1 + \gamma_2 z_2 \xrightarrow{\text{خاک‌های (۱) و (۲) اشباع هستند}} \sigma = \gamma_w z_0 + \gamma_{sat_1} z_1 + \gamma_{sat_2} z_2 \\ u = \gamma_w (z_0 + z_1 + z_2) = \gamma_w z_0 + \gamma_w z_1 + \gamma_w z_2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma' = \sigma - u = z_0 \underbrace{(\gamma_w - \gamma_w)}_{0} + z_1 \underbrace{(\gamma_{sat_1} - \gamma_w)}_{\gamma'_1} + z_2 \underbrace{(\gamma_{sat_2} - \gamma_w)}_{\gamma'_2} \Rightarrow \sigma' = \gamma'_1 z_1 + \gamma'_2 z_2$$

نتایج مهم و کاربردی:

در اینجا می‌خواهیم به بررسی نتایج مهمی از سؤالات فوق بپردازیم:

۱) رابطهٔ $\sigma' = \sigma - u$ که آن را از مفهوم $\sigma = \sigma' + u$ نتیجه گرفتیم، **اصل تنش مؤثر ترزاقی** نام دارد و می‌توان آن را یکی از مهمترین اصول مکانیک خاک دانست. اهمیت این اصل وقتی معلوم می‌شود که بدانید ما برای محاسبه مقاومت و نشست خاک (که مهمترین موضوعات مکانیک خاک هستند) از تنش مؤثر استفاده می‌کنیم نه تنش کل!

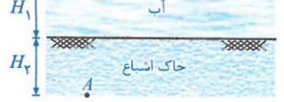
۲) برای محاسبهٔ تنش کل در هر سطح دلخواه، کافی است تا به بالای آن سطح نگاه کنید و وزن مخصوص هر لایه خاک (یا آب) را در ضخامت آن ضرب کرده و سپس مجموع آنها را محاسبه نمایید. توجه کنید که محاسبهٔ تنش کل با شیوهٔ فوق، ارتباطی به تراوش آب در خاک نداشته و در هر صورت برقرار است:

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} (\gamma z)_i$$

در رابطهٔ بالا، n تعداد لایه‌هاست، z ضخامت هر لایه است و γ نیز وزن مخصوص هر لایه می‌باشد که اگر این لایه آب باشد، $\gamma = \gamma_w$ خواهد بود و برای خاک اشباع، نیمه اشباع و خشک نیز به‌ترتیب $\gamma = \gamma_{sat}$، $\gamma = \gamma_t$ و $\gamma = \gamma_d$ است. برای درک بهتر این موضوع به شکل‌های زیر و تنش کل محاسبه شده در نقطهٔ A از آنها توجه کنید.

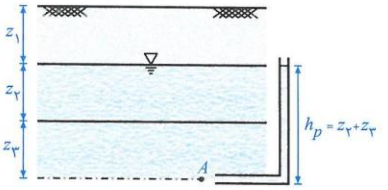
$$\sigma_A = \gamma_w H_1 + \gamma_{sat} H_2$$

$$\sigma_A = \gamma_d H_1 + \gamma_t H_2$$



$$\sigma_A = \gamma_w H_1 + \gamma_{sat} H_2$$

۳ برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای (u) از رابطهٔ $u = \gamma_w \, h_p$ استفاده می‌کنیم که h_p ارتفاع قائم ستون آب در پیزومتر (هد فشار) می‌باشد. توجه داشته باشید که وقتی آب در خاک ساکن است، h_p به سادگی محاسبه می‌شود و برابر فاصلهٔ نقطهٔ موردنظر از سطح آزاد آب است.



۴ برای محاسبهٔ تنش مؤثر در حالتی که آب در خاک ساکن است و مویینگی* نیز رخ نداده است، از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم:

$$\sigma' = \sum_{i=1}^{n} (\gamma' z)_i$$

در این رابطه n معرف تعداد لایه‌های خاک است و z ارتفاع هر لایه را نشان می‌دهد. γ' نیز وزن مخصوص غوطه‌وری خاک می‌باشد.

در محاسبهٔ σ' با استفاده از رابطهٔ فوق، سه حالت مهم و پرکاربرد زیر مورد‌نظر است**:

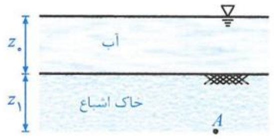
الف) در نواحی کاملاً اشباع ($S_r = 1$)، γ' را به‌صورت $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ محاسبه کرده و استفاده می‌کنیم.

ب) در نواحی خشک ($S_r = 0$)، به جای γ' از γ_d استفاده می‌کنیم.

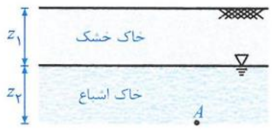
ج) ناحیه‌ای که فقط آب در آن حضور دارد، نقشی در محاسبهٔ تنش مؤثر (که مربوط به دانه‌های جامد است) ندارد. در این نواحی گویی γ' مساوی صفر است زیرا:

$$\gamma' = \gamma_w - \gamma_w = 0$$

توجه به شکل‌های زیر به درک بهتر چگونگی محاسبهٔ تنش مؤثر در خاک کمک می‌کند:



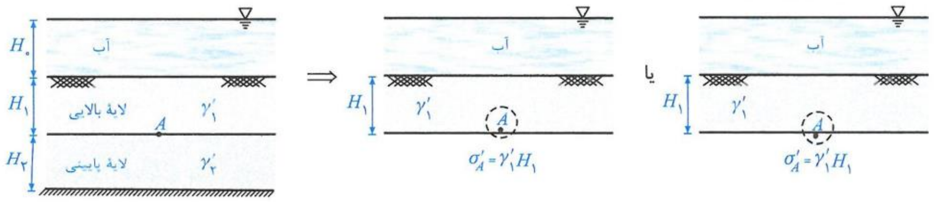
$\sigma'_A = 0 \times z_0 + \gamma' \times z_1 = \gamma' z_1$



$\sigma'_A = \gamma_d \, z_1 + \gamma' z_2$

۵ مجدداً تأکید می‌کنیم که استفاده از رابطهٔ $\sigma' = \sum \gamma' z$، در حالتی که آب در خاک تراوش دارد اشتباه است! این موضوع را در قسمت‌های بعدی این فصل به‌طور کامل بررسی خواهیم کرد.

۶ برای محاسبهٔ تنش مؤثر در مرز دو خاک، می‌توانید نقطهٔ موردنظر را در پایین‌ترین قسمت لایهٔ بالایی و یا بالاترین قسمت لایهٔ پایینی در نظر بگیرید (هیچ فرقی نمی‌کند).



در ادامه برای درک بهتر مطالب این قسمت، به تمرین‌های صفحهٔ بعد توجه کنید.

---

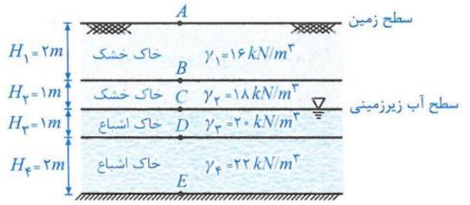
* در مورد مویینگی در قسمت بعد صحبت خواهیم کرد.

** در خاک‌های نیمه اشباع می‌توان با استفاده از رابطهٔ بیشاپ (رابطهٔ زیر)، تنش مؤثر را محاسبه کرد:

$$\sigma' = \sigma - u_a + x\,(u_a - u_w)$$

در رابطهٔ بالا u_w و u_a به‌ترتیب فشار آب حفره‌ای و فشار هوای حفره‌ای می‌باشند و x نیز ضریبی تجربی است که بین صفر و یک می‌باشد. لازم به ذکر است که رابطه بیشاپ کاربرد چندانی در کنکور ندارد و ما برای خاک‌های نیمه اشباع، با فرض کم بودن درجه اشباع، γ' را مساوی γ در نظر می‌گیریم.

تمرین ۱: در پروفیل خاک روبرو، فشار آب حفره‌ای، تنش کل و تنش مؤثر در نقاط A، B، C، D و E را به‌دست آورید. ($\gamma_w = 10\, kN/m^3$)



حل

الف) محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای: در نقاط A و B خاک خشک است و آبی وجود ندارد، بنابراین $u_A = u_B = 0$ می‌باشد. نقطهٔ C نیز روی سطح آزاد آب (سطح فشار نسبی صفر) قرار دارد، بنابراین u_C آن هم مساوی صفر است. اما برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در نقاط D و E کافی است تا با توجه به ساکن بودن آب، فاصلهٔ این نقاط تا سطح آزاد آب را در وزن مخصوص آب ضرب کنیم:

$$u_D = \gamma_w\, H_3 = 10 \times 1 = 10\, kN/m^2$$

$$u_E = \gamma_w\, (H_3 + H_4) = 10 \times (1+2) = 30\, kN/m^2$$

ب) محاسبهٔ تنش کل: برای محاسبهٔ تنش کل از رابطهٔ $\sum_{i=1}^{n} (\gamma z)_i$ استفاده می‌کنیم که برای نقاط گفته شده در صورت سؤال، به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma_A = 0$$

$$\sigma_B = \gamma_1 H_1 = 16 \times 2 = 32\, kN/m^2$$

$$\sigma_C = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 = 16 \times 2 + 18 \times 1 = 50\, kN/m^2$$

$$\sigma_D = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3 = 16 \times 2 + 18 \times 1 + 20 \times 1 = 70\, kN/m^2$$

$$\sigma_E = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3 + \gamma_4 H_4 = 16 \times 2 + 18 \times 1 + 20 \times 1 + 22 \times 2 = 114\, kN/m^2$$

ج) محاسبهٔ تنش مؤثر: برای محاسبهٔ تنش مؤثر ضمن آنکه از اصل تنش مؤثر ($\sigma' = \sigma - u$) استفاده می‌کنیم، با توجه به ساکن بودن آب در خاک، به‌عنوان راه حل دوم از فرمول $\sigma' = \sum_{i=1}^{n} (\gamma' z)_i$ نیز مقدار تنش مؤثر را می‌یابیم:

$$A: \sigma'_A = \sigma_A - u_A = 0 - 0 = 0 \quad \text{یا} \quad \sigma'_A = \sum \gamma' z = 0$$

$$B: \sigma'_B = \sigma_B - u_B = 32 - 0 = 32\, kN/m^2 \ \text{یا}\ \sigma'_B = \gamma'_1 H_1 = \gamma_{d_1} H_1 = 16 \times 2 = 32\, kN/m^2$$

$$C: \sigma'_C = \sigma_C - u_C = 50 - 0 = 50\, kN/m^2 \ \text{یا}\ \sigma'_C = \gamma'_1 H_1 + \gamma'_2 H_2 = \gamma_{d_1} H_1 + \gamma_{d_2} H_2 = 16 \times 2 + 18 \times 1 = 50\, kN/m^2$$

$$D: \sigma'_D = \sigma_D - u_D = 70 - 10 = 60\, kN/m^2$$

$$\text{یا}\ \sigma'_D = \gamma'_1 H_1 + \gamma'_2 H_2 + \gamma'_3 H_3 = \gamma_{d_1} H_1 + \gamma_{d_2} H_2 + (\gamma_{sat_3} - \gamma_w) H_3 = 16 \times 2 + 18 \times 1 + (20 - 10) \times 1 = 60\, kN/m^2$$

$$E: \sigma'_E = \sigma_E - u_E = 114 - 30 = 84\, kN/m^2$$

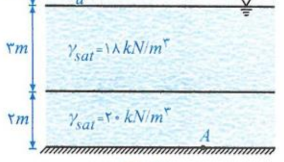
$$\text{یا}\ \sigma'_E = \gamma'_1 H_1 + \gamma'_2 H_2 + \gamma'_3 H_3 + \gamma'_4 H_4 = \gamma_{d_1} H_1 + \gamma_{d_2} H_2 + (\gamma_{sat_3} - \gamma_w) H_3 + (\gamma_{sat_4} - \gamma_w) H_4$$

$$= 16 \times 2 + 18 \times 1 + (20 - 10) \times 1 + (22 - 10) \times 2 = 84\, kN/m^2$$

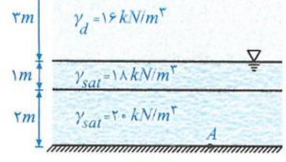
تمرین ۲: دو پروفیل خاک نشان داده شده در شکل‌های زیر را در نظر بگیرید، در پروفیل (۲) سطح آب نسبت به پروفیل (۱) بالاتر آمده و قسمت بیشتری از خاک فوقانی، اشباع شده است.

الف) اختلاف تنش مؤثر در نقطهٔ A، در دو پروفیل را به‌دست آورید.

ب) به نظر شما چگونه می‌توان به‌صورت ذهنی و بدون محاسبهٔ تنش مؤثر در هر حالت، اختلاف تنش مؤثر در نقطهٔ A در پروفیل‌ها را تشخیص داد؟



پروفیل (۲)



پروفیل (۱)

حل:

الف) جهت محاسبهٔ تنش مؤثر در نقطهٔ A از هر شکل می‌نویسیم:

$$\sigma'_{A_1} = \sum_{i=1}^{3} (\gamma' z)_i = 16\times 3 + (18-10)\times 1 + (20-10)\times 2 = 76\ kN/m^2$$

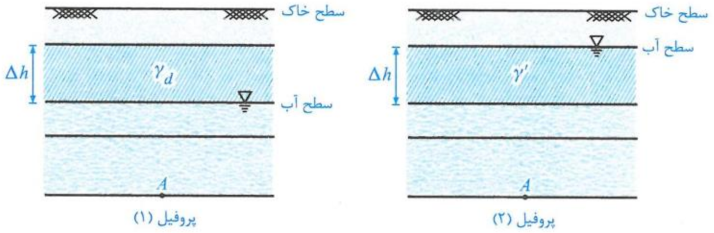
$$\sigma'_{A_2} = \sum_{i=1}^{3} (\gamma' z)_i = 16\times 1 + (18-10)\times 3 + (20-10)\times 2 = 60\ kN/m^2$$

بنابراین اختلاف تنش مؤثر در نقطهٔ A در این دو شکل برابر می‌شود با:

$$\sigma'_{A_1} - \sigma'_{A_2} = 76 - 60 = 16\ kN/m^2$$

ب) برای پاسخ به این قسمت که ایدهٔ آن در مسائل مکانیک خاک کاربرد زیادی دارد، بیایید کمی دقیق‌تر به شکل پروفیل‌های (۱) و (۲) نگاه کنیم. همانطور که در شکل‌های زیر نیز دیده می‌شود، اختلاف این دو پروفیل تنها در قسمت هاشور خورده است. به عبارت دیگر در بالا و پایین قسمت هاشور خورده، دو پروفیل یکسان هستند ولی در شکل سمت چپ، قسمت هاشور خورده با وزن مخصوص γ_d در محاسبهٔ تنش مؤثر نقش دارد و در شکل سمت راست، این قسمت با وزن مخصوص γ' در محاسبهٔ تنش مؤثر وارد می‌شود.

پس می‌توان گفت تنش مؤثر در نقطهٔ A در پروفیل سمت چپ (پروفیل یک) به اندازهٔ $\Delta h\ (\gamma_d - \gamma')$ از پروفیل سمت راست (پروفیل دو) بیشتر است.



پروفیل (۱) پروفیل (۲)

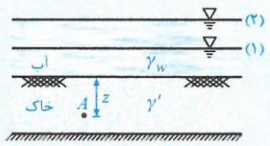
$$\Delta\sigma'_A = \sigma'_{A_1} - \sigma'_{A_2} = \Delta h\ (\gamma_d - \gamma') = 2\times(16 - \boxed{8}) = 16\ kN/m^2$$

$$\gamma_{sat_1} - \gamma_w = 18 - 10 = 8$$

نتیجه مهم

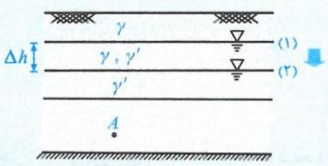
در سؤالاتی که تراز آب جابه‌جا می‌شود (مثلاً به‌علت بارندگی بالا می‌آید یا به علت پمپاژ آب، پایین می‌رود)، در مورد تغییرات تنش مؤثر می‌توان به‌صورت زیر اظهار نظر کرد:

۱) اگر سطح آب در بیرون از خاک بالا یا پایین رود، در نهایت تنش موثر در نقطه‌ای مانند A تغییر نمی‌کند، زیرا لایهٔ آب در محاسبهٔ تنش مؤثر وارد نمی‌شود.



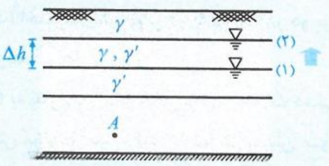
$$\sigma'_A = \gamma' z = const \Rightarrow \Delta\sigma'_A = \sigma'_{A_2} - \sigma'_{A_1} = 0$$

۲) اگر سطح آب در داخل خاک به دلیل پمپاژ آب از سطح (۱) به (۲) جابه‌جا شود، در نهایت تنش مؤثر در نقطه‌ای مانند A افزایش می‌یابد.



$$\Delta\sigma'_A = \sigma'_{A_2} - \sigma'_{A_1} = \Delta h(\gamma - \gamma') > 0$$

۳) اگر سطح آب در داخل خاک به‌دلیل بارندگی از سطح (۱) به (۲) جابه‌جا شود، در نهایت تنش مؤثر در نقطه‌ای مانند A کاهش می‌یابد.

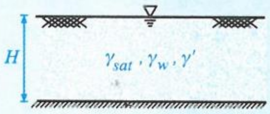


$$\Delta\sigma'_A = \sigma'_{A_2} - \sigma'_{A_1} = \Delta h(\gamma' - \gamma) < 0$$

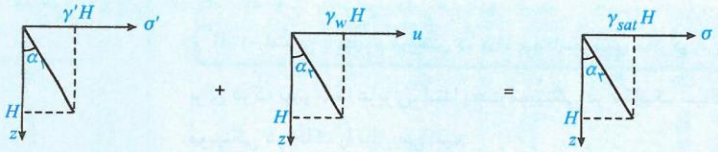
تذکر: نتایج به‌دست آمدهٔ فوق، در فصل‌های آینده کاربرد زیادی دارد.

بررسی یک موضوع جالب

یک لایه خاک اشباع با مشخصات نشان داده شده در شکل زیر را در نظر بگیرید:



نمودار تغییرات تنش مؤثر، فشار آب حفره‌ای و تنش کل در این خاک خطی بوده و به‌صورت زیر است:



$$tan\ \alpha_1 = \frac{\gamma' H}{H} = \gamma' \qquad tan\ \alpha_2 = \frac{\gamma_w H}{H} = \gamma_w \qquad tan\ \alpha_3 = \frac{\gamma_{sat} H}{H} = \gamma_{sat}$$

قسمت دوم (بررسی حالت‌های خاص در خاک‌ها بر تنش مؤثر)

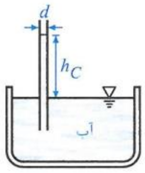
در این قسمت از فصل، ابتدا شما را با مفهوم مویینگی در خاک آشنا کرده و سپس نحوهٔ محاسبهٔ تنش مؤثر به هنگام وقوع این پدیده را یاد می‌گیریم. در ادامه به بررسی رفتار خاک رس در کوتاه مدت و دراز مدت پرداخته و تنش مؤثر در این دو حالت را باهم مقایسه می‌کنیم و در انتها نیز مفهوم لایهٔ آرتزین و نحوه محاسبهٔ تنش مؤثر در این لایه را به شما آموزش می‌دهیم.

B-۱- آشنایی با مفهوم مویینگی در خاک و محاسبهٔ تنش مؤثر در این حالت

برای درک بهتر شما عزیزان، ابتدا بحث مویینگی در مکانیک سیالات را یادآوری و سپس مفهوم مویینگی در خاک را بیان می‌کنیم.

یادآوری مویینگی از مکانیک سیالات

از مکانیک سیالات به خاطر داریم که اگر یک لوله با قطر کم (لولهٔ موئین) را در یک ظرف آب قرار دهیم، به‌دلیل خاصیت کششی سطحی و بیشتر بودن نیروهای چسبندگی (مولکول‌های آب و جدارهٔ لوله) از پیوستگی (بین مولکول‌های آب)، آب در لولهٔ موئین بالا می‌رود و سطح آن با کمی انحناء به شکل مقابل در می‌آید:



در مورد این شکل می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱) ارتفاع h_C که آن را **ارتفاع صعود مویینگی** یا **ارتفاع کاپیلاری*** می‌نامند، برای یک لولهٔ موئین به قطر d، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

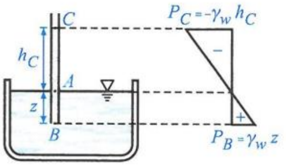
$$h_C = \frac{4\sigma \cos\theta}{\gamma_w \, d}$$

که در این رابطه σ و γ_w به‌ترتیب کشش سطحی و وزن مخصوص آب می‌باشند و θ نیز **زاویهٔ تماس** (زاویه بین کشش سطحی با امتداد قائم) نامیده می‌شود که با توجه به ثابت بودن این پارامترها، می‌توان نتیجه گرفت که:

$$h_C \propto \frac{1}{d}$$

یعنی هر چه قطر لوله کمتر باشد (موئین‌تر باشد)، ارتفاع صعود مویینگی در آن بیشتر است.

۲) در لولهٔ موئین، عملاً در ناحیهٔ صعود مویینگی مکش وجود دارد و فشار آب منفی است. بر همین اساس می‌توان نمودار فشار در لولهٔ موئین را به‌صورت شکل زیر ترسیم کرد:



در ادامه تلاش می‌کنیم تا مفهوم مویینگی و نکات آن را به مکانیک خاک تعمیم دهیم.

---

* مویینگی = *Capillary*

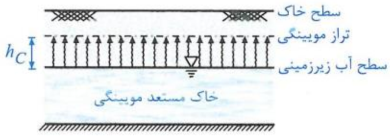
زیر شاخه‌های قسمت دوم

B-۱- آشنایی با مفهوم مویینگی در خاک و محاسبهٔ تنش مؤثر در این حالت

B-۲- بررسی رفتار کوتاه مدت و بلند مدت خاک رس و مقایسهٔ تنش مؤثر در این دو حالت

B-۳- آشنایی با مفهوم لایهٔ آرتزین و محاسبهٔ تنش مؤثر در این لایه

مویینگی در مکانیک خاک و اثر آن بر تنش موثر



در خاک‌هایی از جنس لای و ماسهٔ ریز (خاک‌های مستعد مویینگی)، حفرات بـه هـم پیوستهٔ خاک مانند لوله‌های مـویین عمـل مـی‌کننـد و باعـث صـعود آب در خـاک و مرطوب شدن آن در ناحیهٔ صعود مویینگی می‌شوند. در این شـرایط اتفـاق جالـب آن است که خاک می‌تواند در بالای سطح سفرهٔ آب زیرزمینـی اشـباع شـود، بـدون آنکـه سطح آب زیرزمینی (محل فشار صفر) بالا برود.

در مورد مویینگی در خاک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) میزان ارتفاع صعود مویینگی در خاک‌ها با استفاده از رابطهٔ تجربی زیر قابل محاسبه است:

$$h_C\ (mm) = \frac{C}{eD_{10}}$$

در رابطهٔ بالا، e و D_{10} (برحسب mm) به‌ترتیب نسبت تخلخل و اندازهٔ مؤثر (که در فصل دوم خواندید) خاک هـستند و C نیـز ضـریب ثابتی است که بسته به نوع خاک از ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر مربع متغیر است.

با استفاده از رابطهٔ فوق و با فرض ثابت بودن C و e می‌توان نتیجه گرفت که:

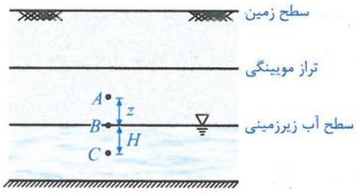
$$h_C \propto \frac{1}{D_{10}}$$

یعنی هر چقدر خاک ریزدانه‌تر باشد، صعود مویینگی در آن بیشتر خواهد بود.

۲) مشابه با مکانیک سیالات، در ناحیهٔ صعود مویینگی فشار آب حفره‌ای منفی است. این موضوع باعث اتفاق جالبی می‌شـود و آن، بیـشتر شدن تنش مؤثر از تنش کل در ناحیهٔ صعود مویینگی است.

$$\sigma' = \sigma - u \xrightarrow{u<0} \sigma' > \sigma$$

۳) درصورتی‌که با رخ دادن مویینگی خاک به‌طور کامل در ناحیهٔ صعود مویینگی اشباع نشود ($S_r < 1$)، در آن‌صورت فشار آب حفره‌ای در ناحیه صعود مویینگی، با توجه به شکل زیر برابر است با:



$$u_A = -S_r\, \gamma_w\, z$$

در مورد رابطهٔ فوق ذکر دو مطلب ضروری است:

- z فاصلهٔ نقطهٔ موردنظر از سطح سفرهٔ آب زیرزمینی است و نباید به اشتباه آن را فاصلهٔ نقطه تا تراز مویینگی در نظر بگیرید.
- اگر خاک اشباع باشد، $S_r = 1$ است و رابطهٔ ما به‌صورت زیر در می‌آید:

$$u_A = -\gamma_w\, z$$

حال اگر بخواهیم فشار آب حفره‌ای در نقاط B و C را به‌دست آوریم، می‌توان گفت:

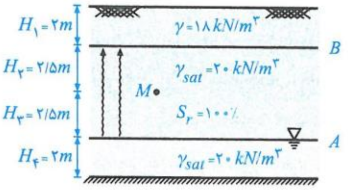
- نقطهٔ B روی سطح سفرهٔ آب زیرزمینی که تراز فشار صفر است قرار دارد، بنابراین $u_B = 0$ است.
- نقطهٔ C زیر سطح سفرهٔ آب زیرزمینی قرار دارد و فشار آب حفره‌ای آن مثبت بوده و مثل مطالبی که قبلاً خوانـدیم، از حاصلضـرب فاصلهٔ نقطه تا سطح آب در وزن مخصوص آب محاسبه می‌شود:

$$u_C = \gamma_w\, H$$

۴) برای محاسبهٔ تنش مؤثر در مسائلی که مویینگی رخ داده است، لزوماً بایستی از اصل تنش مؤثر ترزاقی استفاده شود. یعنـی ابتـدا σ را طبق رابطهٔ گفته شده در قسمت قبل می‌یابیم و سپس با کم کردن u (که در مطلب قبلـی راجـع بـه محاسـبهٔ آن صـحبت کـردیم) از آن، σ' را به‌دست می‌آوریم.

حال در ادامه با حل دو تمرین، مطالب فوق را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۳: سطح آب از عمق A به عمق B در اثر مویینگی صعود کرده است. تنش مؤثر در نقطهٔ M کدام است؟ ($\gamma_w = 10\, kN/m^3$)



(سراسری - ۸۱)

۱) $61\, kN/m^2$

۲) $86\, kN/m^2$

۳) $111\, kN/m^2$

۴) $136\, kN/m^2$

● حل: ابتدا تنش کل را بدون هیچگونه محدودیتی و دقیقاً مثل تمرین‌های قسمت قبل می‌یابیم:

$$\sigma_M = \sum_{i=1}^{2} (\gamma z)_i = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 = 18 \times 2 + 20 \times 2/5 = 86\, kN/m^2$$

دقت شود که در ناحیهٔ صعود مویینگی $S_r = 100\%$ است و به‌همین دلیل $\gamma = \gamma_{sat}$ می‌باشد. از سوی دیگر برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در ناحیهٔ صعود مویینگی (در شرایط $S_r = 1$) خواهیم داشت:

$$u_M = -\gamma_w \boxed{z} = -10 \times 2/5 = -25\, kN/m^2$$

(z: فاصلهٔ M تا سطح آب زیرزمینی)

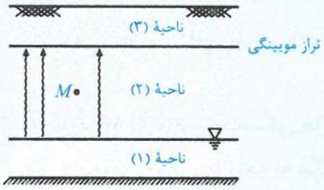
و در نهایت با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی می‌نویسیم:

$$\sigma'_M = \sigma_M - u_M = 86 - (-25) = 111\, kN/m^2$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

چند نتیجه مهم

در شکل مقابل (که همان شکل تمرین قبلی است)، با وقوع مویینگی در خاک، می‌توان به نتایج مهم زیر اشاره کرد:



۱) در اثر صعود مویینگی، تنش کل در همهٔ اعماق زیر تراز مویینگی افزایش می‌یابد، زیرا وزن مخصوص ناحیه (۲) عملاً به دلیل خیس شدن افزایش یافته است.

۲) در ناحیه (۱)، در نهایت فشار آب حفره‌ای ثابت می‌ماند (زیرا جای سطح آب زیرزمینی تغییر نمی‌کند) و افزایش σ باعث افزایش σ' می‌شود.

$$\boxed{\sigma} = \sigma' + \boxed{u} \Rightarrow$$ σ' دقیقاً به اندازه افزایش σ، افزایش می‌یابد تا تساوی برقرار بماند.

(σ: افزایش↑ ، u: ثابت)

۳) در ناحیهٔ (۲)، با صعود مویینگی، فشار آب حفره‌ای منفی می‌شود (کاهش می‌یابد) که با توجه به افزایش σ در سمت چپ رابطه، σ' باید افزایش یابد تا تساوی برقرار شود.

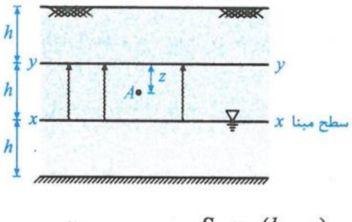
$$\boxed{\sigma} = \sigma' + \boxed{u} \Rightarrow$$ σ' بیشتر از مقدار کاهش u، افزایش می‌یابد.

(σ: افزایش↑ ، u: کاهش↓)

۴) در نقاط بالای تراز مویینگی یعنی ناحیهٔ (۳) هیچگونه تغییری در مقادیر σ'، σ و u رخ نمی‌دهد ($u = 0$ است و $\sigma = \sigma'$ می‌باشد.)

حال شما نیز کمی فکر کنید و به عنوان یک تمرین بگویید که اگر تراز مویینگی مقداری افت کند، تنش مؤثر در نقاط مختلف چگونه تغییر می‌کند؟

تمرین ۴: در شکل روبرو چنانچه سطح آب در اثر مویینگی از تراز $(x-x)$ به تراز $(y-y)$ صعود کرده باشد، در آن‌صورت هدِکل در نقطه A چقدر است؟ (سطح آب زیرزمینی را به‌عنوان تراز مبنا در نظر بگیرید.)

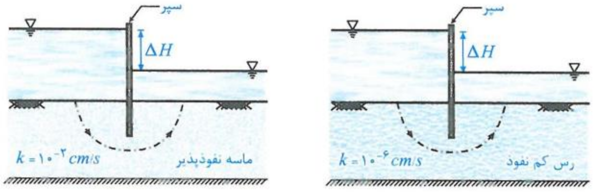


● حل:

$$H_A = \frac{u_A}{\gamma_w} + h_{z_A} = \frac{-S_r\, \gamma_w\, (h-z)}{\gamma_w} + (h-z) = (h-z)(1-S_r)$$

B-۲- بررسی رفتار کوتاه مدت و بلند مدت خاک رس و مقایسهٔ تنش موثر در این دو حالت

دو شکل زیر را که یکی مربوط به خاک رس کم‌نفوذ و دیگری ماسهٔ نفوذپذیر است، در نظر بگیرید:



حال می‌خواهیم ببینیم که با تراوش آب از سمت چپ سپر به طرف راست آن، در چه زمانی اختلاف هد ΔH بین بالا دست و پایین‌دست، در نهایت صفر می‌شود؟

در خاک ماسه‌ای (شکل سمت چپ) چون نفوذپذیری بالاست، بنابراین سرعت حرکت آب در خاک نیز بالا خواهد بود و در زمان کوتاهی ΔH صفر می‌شود. این در حالی است که در خاک رس (شکل سمت راست) چون نفوذپذیری پایین است ($\frac{1}{10000}$ برابر ماسه است)، بنابراین سرعت حرکت آب در خاک نیز پایین خواهد بود و زمان صفر شدن ΔH بسیار طولانی می‌شود.

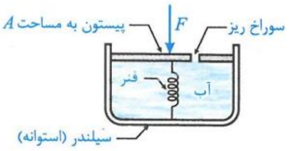
نتیجه و جمع‌بندی بحث فوق

به‌طور خلاصه می‌توان موضوع مطرح شده در بالا را به‌صورت زیر بیان کرد:

رفتار خاک‌ها در زمان:
- **ریزدانه‌ها**:
  - رفتار کوتاه مدت $\Leftarrow$ ΔH تغییر نمی‌کند.
  - رفتار دراز مدت $\Leftarrow$ ΔH صفر می‌شود.
- **درشت‌دانه‌ها:** رفتار کوتاه‌مدت = رفتار دراز مدت $\Leftarrow$ ΔH صفر می‌شود.

در ادامه ابتدا شما را با یک مثال مفهومی (که مدل استوانه و فنر نامیده می‌شود) آشنا می‌کنیم و سپس این مثال را به رفتار خاک رس تعمیم می‌دهیم.

بررسی یک مثال مفهومی (مدل استوانه و فنر)



شکل مقابل را در نظر بگیرید که در آن یک پیستون بر روی یک فنر قرار گرفته است و فنر نیز توسط آب درون سیلندر (استوانه) احاطه شده است. روی پیستون یک سوراخ بسیار ریز وجود دارد و نیروی F به پیستون وارد می‌شود. در مورد تقسیم نیروی F بین فنر و آب در لحظات مختلف می‌توان گفت:

۱) در لحظهٔ $t = 0$ یعنی بلافاصله بعد از اعمال نیروی F، به علت کوچک بودن سوراخ، آب فرصت خارج شدن از زیر پیستون را ندارد. با عدم خروج آب و با توجه به تراکم‌ناپذیری آب، طول فنر تغییر نمی‌کند و نیروی وارد بر آن صفر خواهد بود، بنابراین می‌توان نوشت:

$$t = 0 \Rightarrow \begin{cases} F_{\text{فنر}} = K\,\Delta L \xrightarrow{\Delta L = 0} F_{\text{فنر}} = 0 \\ F = F_{\text{فنر}} + F_{\text{آب}} \xrightarrow{F_{\text{فنر}} = 0} F_{\text{آب}} = F \Rightarrow \Delta P_{\text{آب}} = \dfrac{F}{A} \end{cases}$$

۲) با گذشت زمان، آب به‌تدریج (آرام آرام) از طریق سوراخ ریز تعبیه شده در پیستون، از مجموعه خارج شده و فنر فشرده می‌گردد (تغییر طول می‌دهد). با این عمل نیروی فنر به‌تدریج زیاد می‌شود و در نتیجه از نیرو و فشار وارد بر آب کاسته خواهد شد. توجه کنید که در این شرایط، فنر و آب هر دو در تحمل نیروی F سهیم می‌باشند.

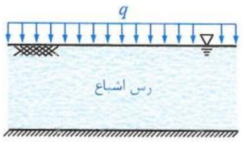
۳) در لحظهٔ $t = \infty$ یعنی مدت مدیدی بعد از اعمال نیروی F، تمام نیرو به فنر می‌رسد و سهم آب از تحمل نیرو صفر می‌شود:

$$t = \infty \Rightarrow \begin{cases} F_{\text{فنر}} = F \\ F_{\text{آب}} = F - F_{\text{فنر}} = F - F = 0 \Rightarrow \Delta P_{\text{آب}} = 0 \end{cases}$$

حالا نوبت آن است که مدل استوانه و فنر را به رفتار خاک رس تعمیم دهیم. پس بیایید با هم به سراغ یک پروفیل از خاک رس اشباع برویم و مدل استوانه و فنر را در مورد آن شبیه‌سازی کنیم.

شبیه‌سازی مدل استوانه و فنر در خاک رس

یک خاک رس اشباع را مطابق شکل زیر در نظر بگیرید که روی آن یک بار گسترده با شدت q و در یک سطح وسیع اعمال شده است.*



شبیه‌سازی این پروفیل با مدل استوانه و فنر به‌صورت زیر است:

- **تودهٔ خاک رس اشباع:** مجموعهٔ فنر، آب اطراف آن، استوانه و پیستون
- **نفوذپذیری خاک رس:** سوراخ بسیار ریز در روی پیستون
- **دانه‌های جامد خاک:** فنر
- **آب حفره‌ای داخل خاک:** آب اطراف فنر
- **تنش مربوط به دانه‌های جامد = تنش مؤثر:** نیروی فنر
- **فشار آب حفره‌ای:** فشار وارد بر آب اطراف فنر
- **بار q :** نیروی اعمال شده به پیستون (نیروی F)

حال در تشریح و توضیح بیشتر این مدلسازی می‌توان گفت:

۱) بلافاصله بعد از اعمال بار q، تمام بار به آب حفره‌ای منتقل می‌شود و ما یک اضافه فشار آب حفره‌ای اولیه (Δu_0) به اندازهٔ q خواهیم داشت. در این شرایط چون مجموعهٔ دانه‌های جامد (مثل فنر) هنوز متراکم نشده‌اند، بنابراین باری را نیز تحمل نخواهند کرد و اضافه تنش مؤثر اولیه ($\Delta\sigma'_0$) برابر صفر است.

۲) با گذشت زمان و مدتی پس از اعمال بار q، آب به‌تدریج از خاک خارج می‌شود و دانه‌های جامد با نزدیک شدن به هم باعث متراکم شدن کل تودهٔ رسی می‌شوند. در این شرایط اضافه فشار آب حفره‌ای رفته رفته کم شده و به تنش مؤثر افزوده می‌شود.

۳) مدت مدیدی بعد از اعمال بار q، سرانجام تمام بار به دانه‌های جامد می‌رسد و تنش مؤثر به اندازه q افزایش می‌یابد. در این شرایط اضافه فشار آب حفره‌ای صفر شده است و دیگر نه آبی از خاک خارج می‌شود و نه خاک متراکم می‌گردد.

بحث فوق را می‌توان به‌طور خلاصه در جدول زیر بیان کرد:

زمان / تنش	قبل از اعمال بار q	لحظهٔ $t=0$	$0<t<\infty$	لحظهٔ $t=\infty$
u (فشار آب حفره‌ای)	u_0	u_0+q	$u_0+(q-\Delta\sigma'_t)$	u_0
σ' (تنش مؤثر)	σ'_0	σ'_0	$\sigma'_0+(q-\Delta u_t)$	σ'_0+q
σ (تنش کل)	σ_0	σ_0+q	σ_0+q	σ_0+q

کوتاه مدت — گذشت زمان ($\Delta\sigma$ ثابت و برابر q است) → دراز مدت

یک اصل اساسی

به‌طور کلی با اعمال بار یا برداشتن آن، تغییر تراز سطح آب زیرزمینی و همچنین وقوع یا برطرف شدن صعود مویینگی در خاک، تنش کل تغییر می‌کند. در خاک رس بلافاصله بعد از تغییر در تنش کل (به هر یک از دلایل فوق)، تنش مؤثر تغییر نکرده و تمام تغییر ایجاد شده در تنش کل به فشار آب حفره‌ای می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که بلافاصله پس از وقوع تغییرات فوق، برای محاسبه h_p و u نمی‌توان از سطح آزاد آب زیرزمینی موجود کمک گرفت. این در حالی است که مدت مدیدی بعد از وقوع تغییرات مذکور، سطح آب زیرزمینی موجود، مبنای محاسبه h_p و u خواهد بود.

در ادامه با حل چند تمرین متنوع، مباحث این بخش را دقیق‌تر بررسی می‌کنیم.

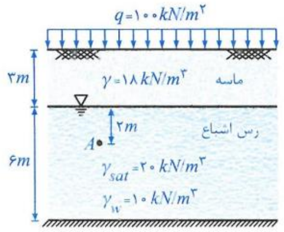
* در فصل بعد خواهیم دید که وقتی یک بار گسترده در سطح وسیع روی خاک اعمال می‌شود، اضافه تنش ناشی از اعمال این بار در خاک با خود بار برابر است.

تمرین ۵: مطابق شکل زیر یک بار گسترده به شدت $q = 100\, kN/m^2$ در یک سطح وسیع روی خاک اعمال می‌شود. با توجـه بـه اطلاعـات داده شده در شکل، مطلوب است تعیین فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر در نقطهٔ A در لحظات زیر:

الف) قبل از اعمال بار

ب) بلافاصله بعد از اعمال بار

ج) مدت مدیدی بعد از اعمال بار



حل:

الف) طبق آنچه در قسمت اول این فصل یاد گرفتیم، برای نقطهٔ A قبل از اعمال بار q می‌توان نوشت:

$$u_0 = h_p \times \gamma_w = 2 \times 10 = 20\, kN/m^2$$

(h_p: فاصله نقطهٔ A از سطح آزاد آب)

$$\sigma_0 = \sum_{i=1}^{2} (\gamma z)_i = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 = 18 \times 3 + 20 \times 2 = 94\, kN/m^2$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u_0 = 94 - 20 = 74\, kN/m^2 \quad \text{یا} \quad \sigma'_0 = \sum_{i=1}^{2} (\gamma' z)_i = \gamma_1 H_1 + \gamma'_2 H_2 = 18 \times 3 + (20 - 10) \times 2 = 74\, kN/m^2$$

(در خاک غیراشباع $\gamma = \gamma'$ لحاظ می‌شود.)

ب) با اعمال بار $q = 100\, kN/m^2$، تنش کل در نقطهٔ A به اندازهٔ بار وارده افزایش پیدا می‌کند، یعنی: $\Delta\sigma = q = 100\, kN/m^2$

بلافاصله بعد از افزایش تنش کل، در لایهٔ رسی تنش مؤثر تغییر نمی‌کند و تمام تغییر ایجاد شده در تنش کل به فشار آب حفره‌ای می‌رسد، بنابراین برای نقطهٔ A می‌نویسیم:

$$\sigma'_{t=0} = \sigma'_0 = 74\, kN/m^2 \ , \quad u_{t=0} = u_0 + \Delta\sigma = 20 + 100 = 120\, kN/m^2$$

ج) مدت مدیدی بعد از اعمال بار $q = 100\, kN/m^2$، اضافه تنش کل در لایهٔ رسی از روی آب حفره‌ای برداشته شده و تماماً به دانه‌های جامد می‌رسد، بنابراین برای نقطهٔ A داریم:

$$u_{t=\infty} = u_0 + \Delta u = u_0 = 20\, kN/m^2$$

($\Delta u = 0$)

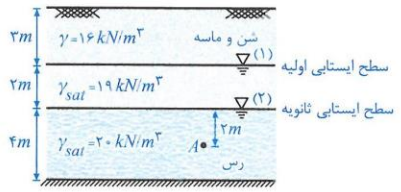
$$\sigma'_{t=\infty} = \sigma'_0 + \Delta\sigma = 74 + 100 = 174\, kN/m^2$$

تمرین ۶: در نیمرخ شکل زیر در یک زمان کوتاه سطح آب ۲ متر پایین آورده شده است. فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر در نقطهٔ A در زمان‌های زیر را به‌دست آورید.

الف) قبل از پایین آمدن سطح آب

ب) بلافاصله بعد از پایین آمدن سطح آب

ج) مدت مدیدی بعد از پایین آمدن سطح آب (سراسری - ۸۲)



حل:

الف) مشابه با تمرین قبل، برای نقطهٔ A قبل از پایین آمدن سطح آب خواهیم داشت:

$$u_0 = h_p \gamma_w = (2 + 2) \times 10 = 40\, kN/m^2$$

$$\sigma_0 = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3 = 16 \times 3 + 19 \times 2 + 20 \times 2 = 126\, kN/m^2$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u_0 = 126 - 40 = 86\, kN/m^2 \quad \text{یا} \quad \sigma'_0 = \gamma_1 H_1 + \gamma'_2 H_2 + \gamma'_3 H_3 = 16 \times 3 + (19 - 10) \times 2 + (20 - 10) \times 2 = 86\, kN/m^2$$

ب) وقتی سطح آب زیرزمینی در لایهٔ شن و ماسه پایین می‌آید، این لایه سبکتر می‌شود و سنگینی کمتری را روی لایهٔ رسی زیر خـود وارد می‌کند، به‌همین دلیل تنش کل در لایهٔ رسی کم می‌شود. با کمی دقت می‌توانیم این کاهش تنش کل در لایهٔ رسی را به‌صورت زیر به‌دست آوریم (در واقع قسمت قرار گرفته بین دو سطح ایستابی با ضخامت $2\,m$، ابتدا با γ_{sat} در محاسبهٔ تنش‌کل شرکت می‌کـرد و پـس از پـایین آمدن سطح آب، با γ در محاسبهٔ تنش کل شرکت می‌کند.)

$$\Delta\sigma = (\gamma - \gamma_{sat})\, \Delta h = (16 - 19) \times 2 = -6\, kN/m^2$$

می‌دانیم بلافاصله بعد از کاهش تنش کل، تنش مؤثر تغییر نمی‌کند و تمام تغییر ایجاد شده به فشار آب حفره‌ای می‌رسد، بنابراین برای نقطهٔ A می‌نویسیم:

$$\sigma'_{t=0} = \sigma'_0 = 86\ kN/m^2$$

$$u_{t=0} = u_0 + \Delta\sigma = 40 + (-6) = 34\ kN/m^2$$

ج) مدت مدیدی بعد از پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و کاهش تنش کل، خاک رس کاملاً خود را با سطح آب موجود (سطح آب جدید) تطبیق داده است و تغییر فشار آب حفره‌ای ایجاد شده نیز به‌طور کامل از بین رفته است، بنابراین نقطهٔ A از سطح آب زیرزمینی جدید تبعیت می‌کند و می‌توان نوشت:

$$u_{t=\infty} = u_{\text{جدید}} + \underbrace{\Delta u}_{\text{صفر}} = u_{\text{جدید}} = (h_p)_{\text{جدید}} \times \gamma_w = 2 \times 10 = 20\ kN/m^2$$

حال اگر بخواهیم تنش مؤثر در نقطهٔ A را در این لحظه محاسبه کنیم، دو روش در پیش روی ماست:

روش اول: تنش مؤثر اولیه (σ'_0) را با اضافه تنش مؤثر نهایی ($\Delta\sigma'$) جمع کنیم:

$$\begin{cases} \sigma'_{t=\infty} = \sigma'_0 + \Delta\sigma' \\ \Delta\sigma' = \Delta h(\gamma - \gamma') = 2 \times (16 - \underbrace{9}_{19-10}) = 14\ kN/m^2 \end{cases} \Rightarrow \sigma'_{t=\infty} = 86 + 14 = 100\ kN/m^2$$

تمرین (۲) در قسمت اول فصل را به یاد آورید.

روش دوم: بگوییم مدت مدیدی بعد از تغییر سطح آب، تنش مؤثر بر مبنای سطح ایستابی ثانویه محاسبه می‌شود، گویی از اول آب در این تراز ایستاده بوده است:

$$\sigma'_{t=\infty} = \sum_{i=1}^{2} (\gamma' z)_i = \gamma_1 H_1 + \gamma'_2 H_2 = 16 \times 5 + (20 - 10) \times 2 = 100\ kN/m^2$$

جمع‌بندی مهم

با توجه به دو تمرین قبلی می‌توان گفت چنانچه رفتار کوتاه مدت و بلند مدت خاک رس مدنظر باشد و مقادیر تنش‌های مؤثر، کل و یا فشار آب حفره‌ای در این دو زمان خواسته شود، بایستی مطابق زیر عمل کنیم:

گام اول: با توجه به مطالب خوانده شده در قسمت اول این فصل مقادیر تنش کل، فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر را می‌یابیم و آنها را به‌ترتیب با σ_0، u_0 و σ'_0 نشان می‌دهیم.

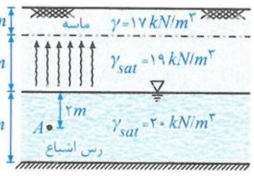
گام دوم: در اثر تغییر ایجاد شده (مثل بارگذاری، باربرداری، جابه‌جایی سطح آب زیرزمینی و ...)، سریعاً تنش کل در لایهٔ رسی به اندازهٔ $\Delta\sigma$ تغییر می‌کند که بایستی آن را محاسبه کنیم. لازم به ذکر است که تنش کل در این حالت برابر $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$ بوده و در کوتاه مدت و بلند مدت همین است.

گام سوم: در کوتاه مدت و بلافاصله بعد از تغییرات فوق، تنش مؤثر در لایه رسی تغییر نمی‌کند و برابر مقدار اولیهٔ خود قبل از بارگذاری (σ'_0) است. این در حالی است که فشار آب حفره‌ای در کوتاه مدت همهٔ $\Delta\sigma$ را به خود می‌گیرد و برابر حاصل جمع u_0 و این $\Delta\sigma$ است.

گام چهارم: در بلند مدت یعنی مدت مدیدی بعد از تغییرات فوق، فشار آب حفره‌ای براساس سطح آب زیرزمینی موجود در بلند مدت محاسبه می‌شود و تنش مؤثر نیز از حاصل جمع σ'_0 و $\Delta\sigma'$ نهایی به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که $\Delta\sigma'$ نهایی می‌تواند برابر بار وارده، تغییرات تنش مؤثر در اثر جابه‌جایی سطح آب زیرزمینی و ... باشد.

در ادامه بیایید تمرین بعدی را با توجه به جمع‌بندی فوق حل کنیم.

تمرین ۷: در شکل زیر در اثر صعود مویینگی تراز آب ۳ متر بالا آمده است. تنش مؤثر و فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A بلافاصله بعد از صعود مویینگی و مدت مدیدی بعد از صعود مویینگی را به‌دست آورید.



پاسخ

گام اول: ابتدا مقادیر σ_0، u_0 و σ'_0 را برای نقطهٔ A می‌یابیم:

$$\sigma_0 = \sum_{i=1}^{2} (\gamma z)_i = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 = 17 \times 4 + 20 \times 2 = 108\, kN/m^2$$

قبل از موویینگی، ارتفاع ۴ متر ماسه کاملاً خشک است.

$$u_0 = h_p\, \gamma_w = 2 \times 10 = 20\, kN/m^2$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u_0 = 108 - 20 = 88\, kN/m^2$$

گام دوم: حالا نوبت آن است که مقدار $\Delta\sigma$ را به‌دست آوریم. می‌دانیم لایهٔ ماسه‌ای قبل از صعود موویینگی غیراشباع بوده و دارای وزن مخصوص $\gamma = 17\, kN/m^3$ بوده است و بعد از صعود موویینگی به اندازه ۳ متر اشباع و دارای وزن مخصوص $\gamma_{sat} = 19\, kN/m^3$ شده است. پس اضافه تنش کلی که به لایهٔ زیر خود یعنی رس وارد می‌کند، برابر است با: $\Delta\sigma = h_C\,(\gamma_{sat} - \gamma) = 3 \times (19 - 17) = 6\, kN/m^2$

گام سوم: بلافاصله بعد از صعود موویینگی، تنش مؤثر برابر مقدار اولیه خود در قبل از صعود است و فشار آب حفره‌ای نیز به اندازهٔ $\Delta\sigma$ نسبت به حالت اولیه اضافه خواهد شد، پس برای نقطهٔ A داریم:

$$\sigma'_{t=0} = \sigma'_0 = 88\, kN/m^2 \quad , \quad u_{t=0} = u_0 + \Delta\sigma = 20 + 6 = 26\, kN/m^2$$

گام چهارم: مدت مدیدی بعد از صعود موویینگی فشار آب حفره‌ای بر مبنای سطح آب زیرزمینی موجود محاسبه می‌شود و تنش مؤثر نیز به اندازه $\Delta\sigma'$ نسبت به حالت اولیه اضافه خواهد شد، پس برای نقطهٔ A می‌نویسیم:

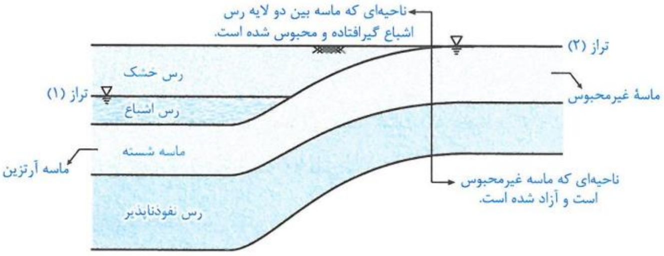
$$u_{t=\infty} = u_0 = 20\, kN/m^2$$

$$\sigma'_{t=\infty} = \sigma'_0 + \Delta\sigma' = \sigma'_0 + h_C\,(\gamma_{sat} - \gamma) = 88 + 3 \times (19 - 17) = 94\, kN/m^2$$

$\Delta\sigma' = \Delta\sigma$

B-۳- آشنایی با مفهوم لایهٔ آرتزین و محاسبهٔ تنش مؤثر در این لایه

شکل زیر را در نظر بگیرید که در آن ماسهٔ شسته که نفوذپذیری بالایی دارد بین دو لایهٔ رسی کم نفوذ، گیر افتاده است.



به‌طور کلی اگر یک لایه خاک با نفوذپذیری بالا (مثل مخلوط شن و ماسه یا ماسهٔ شسته یا ...) بین دو لایه نفوذناپذیر یا کم نفوذ (مثل بستر سنگی یا رس) قرار گیرد، در آن‌صورت گویی لایهٔ موردنظر به سطح آب زیرزمینی تراز (۱) دسترسی ندارد (اصطلاحاً ارتباط هیدرولیکی این لایه با لایهٔ بالا و پایین خود قطع شده است) و برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای و هدِکل، نمی‌توان از سطح آزاد آب در محل (تراز ۱) استفاده کرد. در این حالت تراز پیزومتری مربوط به این لایه، سطح آزاد آب (یا سفرهٔ آب زمینی) در ناحیه‌ای دورتر و غیر محبوس (تراز ۲) خواهد بود. ما به این لایه نفوذپذیر و محبوس، **لایهٔ آرتزین** یا **لایهٔ تحت فشار** می‌گوییم.

در ادامه با بررسی چند سؤال، ضمن درک بهتر مفهوم لایهٔ آرتزین، با ویژگی‌های این لایه نیز آشنا خواهیم شد:

بررسی چند سوال

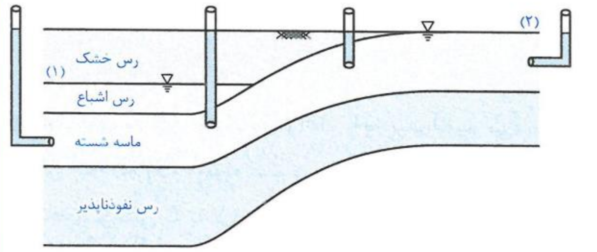
سؤال ۱: با توجه به نفوذپذیری بالای لایهٔ آرتزین، انتظار می‌رود که آب در این لایه با سرعت بالایی جریان داشته باشد. آیا چنین است و آب در لایهٔ آرتزین جریان دارد؟

پاسخ: تعجب نکنید، در لایهٔ آرتزین آب جریان ندارد و ساکن است!

در لایهٔ آرتزین یا هر خاک درشت‌دانهٔ دیگری چون نفوذپذیری بالاست، سرعت حرکت آب در خاک بسیار بالا بوده و طبق آنچه قبلاً گفتیم، افت هدِکل یعنی ΔH سریعاً صفر می‌شود، در نتیجه ظرف مدت کوتاهی حرکت آب در خاک متوقف خواهد شد. پس زمانی‌که یک لایهٔ آرتزین را در پروفیل خاک مشاهده می‌کنید، یادتان باشد که آب در آن ساکن است.

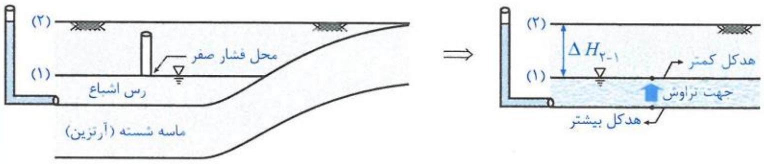
سؤال ۲: اگر پیزومترهایی در نقاط مختلف ماسهٔ شسته (لایهٔ آرتزین) قرار دهیم، در آن‌صورت سطح آب در این پیزومترها در چه ترازی می‌ایستد؟

● پاسخ: چون در لایهٔ آرتزین آب در خاک حرکت ندارد، بنابراین هدِکل تمام نقاط آن یکسان بوده و تراز پیزومتری همه نقاط این لایه یکسان است. از طرف دیگر می‌دانیم تراز پیزومتری لایهٔ آرتزین، سطح آب در ناحیه‌ای دورتر و غیرمحبوس یعنی تراز (۲) است.



سؤال ۳: چگونه می‌توان با قرار دادن پیزومتر در بالا و پایین لایهٔ رسی اشباع که در بالای لایهٔ آرتزین قرار دارد، در مورد حرکت آب در این لایهٔ رسی اظهار نظر کرد؟

● پاسخ: پایین‌ترین قسمت این لایهٔ رسی، در واقع بالاترین قسمت لایهٔ آرتزین است. از طرفی می‌دانیم که تراز پیزومتری تمام نقاط لایهٔ آرتزین، تراز (۲) است. بنابراین اگر پیزومتری در پایین‌ترین قسمت لایهٔ رسی مذکور قرار دهیم، آب در این پیزومتر، در تراز (۲) می‌ایستد. در ادامه با توجه به وضعیت آب در پیزومتری که در بالای رس قرار گرفته است، جهت تراوش آب در لایهٔ رسی را به‌صورت زیر تشخیص می‌دهیم:



سؤال ۴: آیا برای محاسبهٔ σ' در نقاط مختلف ماسه (لایهٔ آرتزین)، می‌توانیم با توجه به عدم حرکت آب در خاک از رابطهٔ $\sigma' = \sum_{i=۱}^{n} (\gamma' z)_i$ استفاده کنیم؟

● پاسخ: استفاده از رابطهٔ بالا در صورتی مجاز است که علاوه بر لایهٔ موردنظر، در لایه‌های بالایی آن نیز آب در خاک حرکت نداشته باشد. بنابراین با این توضیح واضح است که نمی‌توان از رابطهٔ مذکور در تعیین تنش مؤثر در لایهٔ آرتزین استفاده کرد.

سؤال ۵: برای محاسبهٔ تنش مؤثر در نقاط مختلف لایهٔ آرتزین (ماسهٔ شسته)، چه مراحلی را باید طی کنیم؟

● پاسخ: برای این منظور مطابق گام‌بندی زیر عمل می‌کنیم:

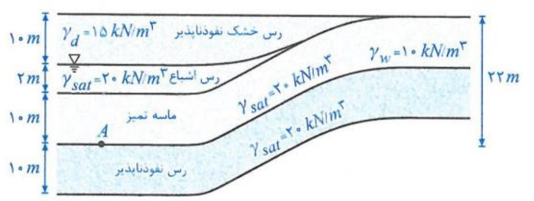
گام اول: تنش کل (σ) را با توجه به وزن مخصوص و ضخامت لایه‌های بالایی نقطهٔ موردنظر به‌دست می‌آوریم. ($\sigma = \sum_{i=۱}^{n} (\gamma z)_i$)

گام دوم: فشار آب حفره‌ای (u) در نقطهٔ موردنظر را براساس تراز (۲) که در ناحیه‌ای دورتر و غیرمحبوس است، محاسبه می‌کنیم.

گام سوم: با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی، مقدار تنش مؤثر (σ') در نقطهٔ مذکور را به صورت مقابل می‌یابیم: $\sigma' = \sigma - u$

برای درک بهتر مطالب گفته شده به تمرین‌های زیر توجه کنید.

تمرین ۸: در پروفیل زیر حداقل تنش مؤثر در نقطهٔ A در طول سال چقدر است؟ (بارندگی منطقه بسیار زیاد است و از اثرات موئینگی صرفنظر کنید.) (سراسری - ۸۶)



۱) $\sigma'_{min} = ۳۵۰ \ kN/m^۲$

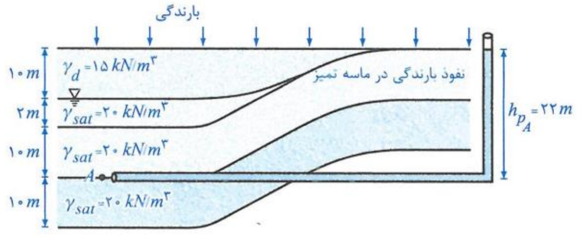
۲) $\sigma'_{min} = ۳۹۰ \ kN/m^۲$

۳) $\sigma'_{min} = ۲۷۰ \ kN/m^۲$

۴) $\sigma'_{min} = ۱۷۰ \ kN/m^۲$

حل: لایهٔ ماسه‌ای در نقطه‌ای که تنش مؤثر آن خواسته شده، یک لایه آرتزین می‌باشد ولی در سمتِ راست پروفیل نشان داده شده در شکل، آزاد و غیر محبوس است.

به هنگام بارندگی زیاد در منطقه، این لایهٔ ماسهٔ تمیز کاملاً اشباع می‌شود و سطح سفرهٔ آب زیرزمینی تا سطح خاک بالا می‌آید. از آنجائیکه تراز پیزومتری نقاطِ لایه آرتزین، سطح آزاد آب در ناحیه‌ای دورتر و غیرمحبوس است، بنابراین می‌توان گفت که این سطحِ بالاآمدهٔ آب، تراز پیزومتری نقاط لایهٔ آرتزین از جمله نقطهٔ مرزی A است. در شرایط اشباع کامل لایهٔ ماسه‌ای، فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A حداکثر بوده و تنش مؤثر حداقل به‌صورت زیر قابل محاسبه است:



$$\sigma'_{min} = \sigma - u_{max}$$

(σ ثابت است)

در ادامه برای محاسبهٔ σ'_{min} به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

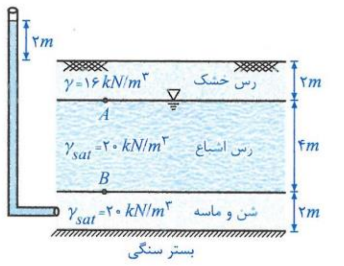
$$\sigma_A = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3 = 15\times 10 + 20\times 2 + 20\times 10 = 390\ kN/m^2$$

$$u_{A_{max}} = h_{p_A} \times \gamma_w = 22\times 10 = 220\ kN/m^2$$

$$(\sigma'_A)_{min} = \sigma_A - (u_A)_{max} = 390 - 220 = 170\ kN/m^2$$

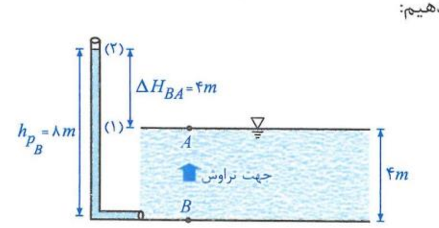
یعنی گزینه (۴) پاسخ صحیح است.

تمرین ۹: در پروفیل شکل زیر اولاً جهت حرکت آب در خاک رس اشباع را مشخص کنید، ثانیاً تنش مؤثر در نقـاط A و B را برحسب kN/m^2 به‌دست آورید. ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$)



حل: در پروفیل داده شده عملاً با یک لایهٔ آرتزین روبرو هستیم، زیرا شن و ماسهٔ نفوذپذیر، بین رس کم نفوذ و بستر سنگی نفوذناپذیر گرفتار شده است.

از سوی دیگر در این شکل دو تراز پیزومتری متفاوت مشاهده می‌شود که یکی از آنها سطح سفرهٔ آب زیرزمینی (سطح ۱) است و دیگری سطح آب در پیزومتر لایهٔ آرتزین (سطح ۲) است. با توجه به توضیحات فوق و نیز مطالبی که در بررسی چند سؤال یاد گرفتیم (به‌خصوص پاسخ سؤال ۳)، می‌توانیم وضعیت حرکت آب در خاک رس اشباع را به‌صورت زیر نشان دهیم:



در ادامه برای محاسبهٔ تنش مؤثر در نقاط A و B، خواهیم داشت:

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = \gamma_1 H_1 - h_{p_A}\gamma_w = 16\times 2 - 0 = 32\ kN/m^2$$

$$\sigma'_B = \sigma_B - u_B = (\gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2) - h_{p_B}\gamma_w = (16\times 2 + 20\times 4) - (8\times 10) = 32\ kN/m^2$$

قسمت سوم/ کاربرد اصل تنش مؤثر در محاسبهٔ تنش مؤثر خاک‌های دارای تراوش

در قسمت قبل با چگونگی محاسبهٔ تنش مؤثر در یک لایه خاک کـه در آن آب جریـان نـدارد، آشنا شدیم و همچنین برخی حالت‌های خاص در خاک‌های مختلف را دیدیم. حال می‌خـواهیم با چگونگی محاسبهٔ تنش مؤثر در لایهٔ خاکی که در آن تراوش وجود دارد، آشنا شویم. بـه‌طـور کلی برای محاسبهٔ تنش مؤثر در خاکی که در آن تراوش رخ می‌دهد، دو دیدگاه زیر وجود دارد:

دیدگاه اول: استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی به‌عنوان یک روش ساده

دیدگاه دوم: استفاده از مفهوم فشار تراوش

در ادامهٔ بحث، در این قسمت دیدگاه اول را بررسی می‌کنیم. سپس در قسمت بعدی این فصل به‌طور جداگانه به دیدگاه دوم و مفهوم فشار تراوش خواهیم پرداخت.

C-۱- محاسبهٔ تنش موثر با استفاده از اصل تنش موثر در حالت تراوش یک بعدی

همانطور که در قسمت اول این فصل گفته شد، رابطه $\sigma' = \sum \gamma' z$ در حالتی که آب در خـاک تراوش دارد استفاده نمی‌شود. برای محاسبهٔ σ' در مسائل دارای تـراوش، سـاده‌تـرین روش آن است که از اصل تنش مؤثر ترزاقی، مطابق گام‌بندی زیر استفاده کنیم.

گام اول: ابتدا با کمک رابطه $\sigma = \sum \gamma z$، تنش کل در نقطهٔ مـوردنظر را مـی‌یـابیم. (بـه‌خـاطر داریم که این رابطه در هر حالتی اعم از سکون، تراوش، مویینگی و ... برقرار است).

گام دوم: سپس با کمک مفاهیم خوانده شده در فصل قبل، هد فشار (h_p) در نقطهٔ موردنظر را به‌دست آورده و پس از آن به‌صورت زیر، فشار آب حفره‌ای را محاسبه می‌کنیم:

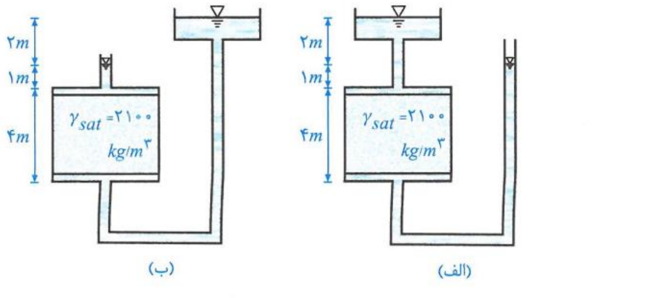
$$u = h_p \times \gamma_w$$

گام سوم: در نهایت با کمک اصل تنش مؤثر ترزاقی، به‌سـادگی تـنش مـؤثر را بـه‌صـورت زیـر به‌دست می‌آوریم:

$$\sigma' = \sigma - u$$

همانطور که مشاهده می‌شود، هیچ نکته‌ای در روند فوق وجود ندارد که ما قبلاً بـا آن آشـنا نـشده باشیم. آنچه در حل مسائل تنش مـؤثر در ایـن روش اهمیـت دارد، محاسـبهٔ فـشار آب حفـره‌ای می‌باشد، بنابراین بایستی روی مفاهیم مربوط به هد فشار و نحوهٔ محاسـبهٔ آن کـه در فـصل قبـل خواندیم، تسلط داشته باشیم. در ادامه با حل چند تمرین متنوع، روند فوق را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۱۰: در شکل‌های زیر تنش مؤثر در وسط نمونه خاک نشان داده شده را به‌دست آورید.



(ب) (الف)

حل: مطابق با گام‌بندی گفته شده، برای نقطهٔ قرار گرفته در وسط خـاک (عمـق ۲ متـری از سطح خاک) خواهیم داشت:

گام اول: محاسبه σ

$$\sigma_{\text{الف}} = \gamma_w H_w + \gamma_{sat} H = ۱۰۰۰ \times ۳ + ۲۱۰۰ \times ۲ = ۷۲۰۰ \ kg/m^۲$$

$$\sigma_{\text{ب}} = \gamma_w H_w + \gamma_{sat} H = ۱۰۰۰ \times ۱ + ۲۱۰۰ \times ۲ = ۵۲۰۰ \ kg/m^۲$$

زیر شاخه‌های قسمت سوم

C-۱- محاسبهٔ تنش مؤثر بـا استفاده از اصـل تنش مؤثر در حالت تراوش یک بعدی

C-۲- محاسـبهٔ تـنش مـؤثر بـا استفاده از اصـل تنش مؤثر در حالت تراوش دو بعدی

گام دوم: محاسبه u (در این گام از مفاهیم فصل قبل استفاده می‌کنیم)

از آنجائی‌که تغییرات فشار آب حفره‌ای در یک لایه خاک به‌صورت خطی است، کافی است تا فشار آب حفره‌ای در بالا و پایین نمونهٔ خاک‌ها را به‌دست آوریم و سپس با توجه به آنکه نقطهٔ موردنظر در وسط نمونه قرار دارد، از میانگین دو عدد بـه‌دسـت آمـده، فـشار آب حفـره‌ای در وسط نمونه را بیابیم:

الف)

فاصله سطح آب روی خاک تا بالای نمونه: ۳

فاصله سطح آب سمت راست تا پایین نمونه: ۵

$$\begin{cases} u_{\text{بالا}} = h_p \times \gamma_w = ۳ \times ۱۰۰۰ = ۳۰۰۰\ kg/m^۲ \\ u_{\text{پایین}} = h_p \times \gamma_w = ۵ \times ۱۰۰۰ = ۵۰۰۰\ kg/m^۲ \end{cases} \Rightarrow u_{\text{وسط}} = \frac{u_{\text{بالا}} + u_{\text{پایین}}}{۲} = \frac{۳۰۰۰ + ۵۰۰۰}{۲} = ۴۰۰۰\ kg/m^۲$$

ب)

فاصله سطح آب روی خاک تا بالای نمونه: ۱

فاصله سطح آب سمت راست تا پایین نمونه: ۷

$$\begin{cases} u_{\text{بالا}} = h_p \times \gamma_w = ۱ \times ۱۰۰۰ = ۱۰۰۰\ kg/m^۲ \\ u_{\text{پایین}} = h_p \times \gamma_w = ۷ \times ۱۰۰۰ = ۷۰۰۰\ kg/m^۲ \end{cases} \Rightarrow u_{\text{وسط}} = \frac{u_{\text{بالا}} + u_{\text{پایین}}}{۲} = \frac{۱۰۰۰ + ۷۰۰۰}{۲} = ۴۰۰۰\ kg/m^۲$$

* توصیه می‌شود که با محاسبهٔ افت هد و مشابه تمرین‌های فصل (۴) نیز فشار آب حفره‌ای را حساب کنید.

گام سوم: محاسبه σ' (با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی)

$$\begin{cases} \sigma'_{\text{الف}} = \sigma - u = ۷۲۰۰ - ۴۰۰۰ = ۳۲۰۰\ kg/m^۲ \\ \sigma'_{\text{ب}} = \sigma - u = ۵۲۰۰ - ۴۰۰۰ = ۱۲۰۰\ kg/m^۲ \end{cases}$$

کمی توضیح بیشتر

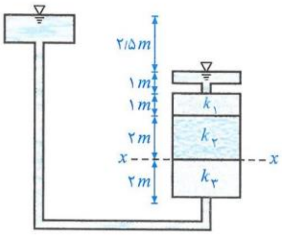
از آنجائی‌که تغییرات تنش کل و فشار آب حفره‌ای در یک لایه خاک به‌صورت خطی می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییـرات تنش مؤثر نیز در هر لایه خطی است. پس در تمرین (۱۰) می‌توانیم از میانگین تنش مؤثر در بالا و پایین نمونهٔ خاک نیز، به‌طور مستقیم تنش مؤثر در وسط لایه را بیابیم. به‌عنوان مثال برای حالت (الف) داریم:

$$\begin{cases} \sigma'_{\text{بالا}} = ۰ \\ \sigma'_{\text{پایین}} = \sigma_{\text{پایین}} - u_{\text{پایین}} = (\underbrace{۱۰۰۰}_{\gamma_w} \times ۳ + \underbrace{۲۱۰۰}_{\gamma_{sat}} \times ۴) - (۵ \times \underbrace{۱۰۰۰}_{\gamma_w}) = ۶۴۰۰\ kg/m^۲ \end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma'_{\text{وسط}} = \frac{\sigma'_{\text{بالا}} + \sigma'_{\text{پایین}}}{۲} = \frac{۰ + ۶۴۰۰}{۲} = ۳۲۰۰\ kg/m^۲$$

تمرین ۱۱: اگر وزن مخصوص اشباع هرسه لایه خاک $۲۰\ kN/m^۳$ و وزن مخصوص آب $۱۰\ kN/m^۳$ باشند، مطلوب است تعیین تنش مـؤثر در مـرز لایه ۲ و ۳ $(x - x)$ برحسب $kN/m^۲$. $(k_۳ = ۴k_۱ = ۲k_۲)$

(سراسری - ۸۳)



۱) ۱۰

۲) ۲۰

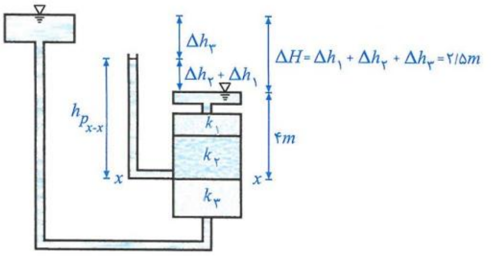
۳) ۳۰

۴) ۴۰

حل

گام اول: ابتدا تنش کل را در تراز $(x - x)$ محاسبه می‌کنیم:

$$\sigma_{x-x} = ۱۰ \times ۱ + ۲۰ \times ۱ + ۲۰ \times ۲ = ۷۰\ kN/m^۲$$



گام دوم: سپس با توجه به اینکه آب در خاک حرکت دارد، یک پیزومتر در تراز $(x-x)$ قرار داده و مشابه با مسائل فصل قبل، فشار آب حفره‌ای در این تراز را می‌یابیم (به توضیحات روی شکل دقت کنید):

$$\Rightarrow h_{p_{(x-x)}}=4+2/5-\Delta h_3=6/5-\Delta h_3$$

$$\text{نسبت } \frac{L}{Ak}\begin{cases}\text{لایه (1)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_1=\frac{1}{A\times k_1}=2\times(\frac{1}{2Ak_1})=2x\\ \text{لایه (2)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_2=\frac{2}{A\times 2k_1}=2\times(\frac{1}{2Ak_1})=2x\\ \text{لایه (3)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_3=\frac{2}{A\times 4k_1}=\frac{1}{2Ak_1}=x\end{cases} \Rightarrow \Delta h_3=(\frac{x}{2x+2x+x})\Delta H_{\text{کل}}=\frac{1}{5}\times 2/5=0/5\,m$$

$$h_{p_{(x-x)}}=6/5-0/5=6\,m \Rightarrow u_{x-x}=h_{p_{(x-x)}}\gamma_w=6\times 10=60\,kN/m^2$$

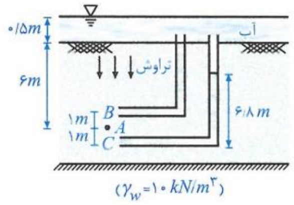
* توصیه می‌شود که با انتخاب سطح مبنا و استفاده از رابطهٔ $(H-z)\gamma_w$ نیز فشار را به‌دست آورید.

گام سوم: حال در انتها با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی، تنش مؤثر در تراز $x-x$ را می‌یابیم:

$$\sigma'_{x-x}=\sigma_{x-x}-u_{x-x}=70-60=10\,kN/m^2$$

بنابراین گزینه (۱) درست است.

تمرین ۱۴: پروفیل قائمی از توده خاک همگن با وزن مخصوص اشباع ($\gamma_{sat}=20\,kN/m^3$) که در معرض جریان تراوش آب قرار گرفته، نشان داده شده است. باتوجه به سطح آب داخل پیزومترها، مقدار تنش مؤثر در خاک، در تراز A چند kN/m^2 است؟ (سراسری – ۸۱)



۱) ۵۵
۲) ۶۱
۳) ۶۶
۴) ۵۱

● حل: ابتدا تنش مؤثر در نقاط B و C را می‌یابیم تا پس از آن با توجه به خطی بودن تغییرات تنش مؤثر، σ' برای نقطهٔ A به‌دست آید:

$$\sigma'_B=\sigma_B-u_B=(\gamma_w H_w+\gamma_{sat}H_B)-(h_{p_B}\times\gamma_w)=(10\times 0/5+20\times 5)-(5\times 10)=55\,kN/m^2$$

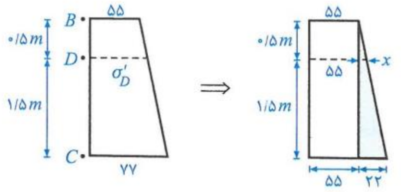
$$\sigma'_C=\sigma_C-u_C=(\gamma_w H_w+\gamma_{sat}\times H_C)-(h_{p_C}\times\gamma_w)=(10\times 0/5+20\times 7)-(6/8\times 10)=77\,kN/m^2$$

حالا با توجه به اینکه نقطهٔ A در وسط B و C قرار دارد، می‌توان نوشت:

$$\sigma'_A=\frac{\sigma'_B+\sigma'_C}{2}=\frac{55+77}{2}=66\,kN/m^2$$

بنابراین گزینهٔ (۳) درست است.

تذکر: برای پیدا کردن تنش مؤثر در نقطه‌ای مانند D که جایی غیر از وسط A و B قرار دارد، به‌سادگی می‌توانید از خطی بودن تنش مؤثر در لایه کمک گرفته و بنویسید:



در مثلث هاشور خورده: $\frac{x}{22}=\frac{0/5}{2}$

$x=5/5$

$\sigma'_D=55+5/5=60/5\,kN/m^2$

C-۲- محاسبهٔ تنش مؤثر با استفاده از اصل تنش موثر در حالت تراوش دو بعدی

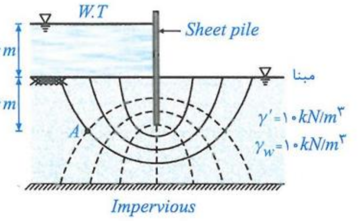
در فصل قبل و در قسمت مربوط به حرکت دو بعدی آب در خاک (بحث شبکهٔ جریان)، دیدیم که چگونه می‌توان با کمک مشخصات و ویژگی‌های شبکهٔ جریان، فشار آب حفره‌ای را در یک نقطه محاسبه کرد. همچنین در ابتدای این فصل یاد گرفتیم که برای محاسبهٔ تنش کل در هر نقطه، باید حاصل‌ضرب وزن مخصوص در ضخامت لایه‌های بالایی آن نقطه را با هم جمع کنیم که البته این موضوع کلیت داشته و در هر حالت، از جمله تراوش دو بعدی نیز برقرار است.

حال که تنش کل و فشار آب حفره‌ای در هر نقطه قابل محاسبه است، پس با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی می‌توان به‌سادگی تنش مؤثر در آن نقطه را نیز به‌دست آورد.

در ادامه با حل دو تمرین نشان می‌دهیم که محاسبهٔ تنش مؤثر در حالت تراوش دو بعدی، فرق چندانی با حالت تراوش یک بعدی ندارد.

تمرین ۱۳: در شرایط زیر، تنش مؤثر در نقطه A برحسب kN/m^2 برابر است با: (سراسری - ۸۵)

۱) ۵۲/۵
۲) ۶۰
۳) ۶۷/۵
۴) ۷۲/۵



حل: گام‌بندی گفته شده در حالت تراوش یک بعدی را در اینجا نیز به‌کار می‌بریم:

گام اول:

$$\sigma_A=\sum_{i=1}^{2}(\gamma z)_i=10\times6+20\times6=180\,kN/m^2$$

گام دوم:

$$u_A=h_{p_A}\times\gamma_w\quad,\quad h_{p_A}=H_A-h_{z_A}\quad,\quad H_A=H_{top}-n\,\Delta h=6-1\times\Delta h=6-1\times\frac{6}{8}=5.25\,m \qquad \left(\Delta h=\frac{\Delta H}{N_d}\right)$$

$$\Rightarrow u_A=[H_A-h_{z_A}]\times\gamma_w=[5.25-(-6)]\times10=112.5\,kN/m^2$$

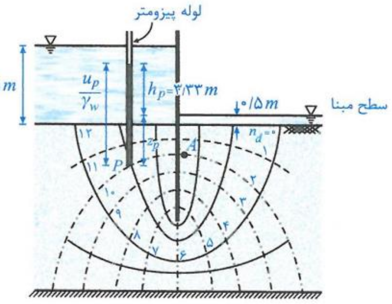
گام سوم:

$$\sigma'_A=\sigma_A-u_A=180-112.5=67.5\,kN/m^2$$

بنابراین گزینه (۳) صحیح است.

تمرین ۱۴: نقطهٔ A در سمت راست سپر و در عمق ۳/۴ متری خاک واقع است. سطح آب در بالادست چند متر نسبت به وضعیت فعلی افزایش یابد تا تنش مؤثر در نقطهٔ A صفر گردد؟ ($\gamma_w=10\,kN/m^3$ و $\gamma_{sat}=20\,kN/m^3$) (سراسری - ۸۹)

۱) ۱۶/۴
۲) ۱۲/۴
۳) ۸/۶
۴) ۳۸/۶



حل: مشابه تمرین قبل می‌نویسیم:

گام اول (محاسبه σ): ابتدا تنش کل در نقطهٔ A را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\sigma_A=10\times0.5+20\times3.4=73\,kN/m^2$$

گام دوم (محاسبهٔ u): در این سؤال سطح آب در بالادست (سمت چپ) به اندازهٔ x بالا رفته است. حال اگر سطح آب در پایین‌دست را به‌عنوان سطح مبنا انتخاب کنیم، در آن‌صورت محاسبه فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} u_A = h_{p_A} \times \gamma_w = (H_A - h_{z_A}) \times \gamma_w \\ H_A = (۴/۵ + x - ۰/۵) - ۱۰ \times \Delta h \quad , \quad \Delta h = \dfrac{\Delta H}{N_d} = \dfrac{۴/۵ + x - ۰/۵}{۱۲} = \dfrac{۴ + x}{۱۲} \Rightarrow H_A = ۴ + x - ۱۰ \times (\dfrac{۴ + x}{۱۲}) = \dfrac{۱}{۶}(۴ + x) \end{cases}$$

$$\Rightarrow u_A = [\frac{۱}{۶}(۴ + x) - (-۳/۹)] \times ۱۰ = \frac{۵}{۳}(۴ + x) + ۳۹$$

گام سوم (محاسبهٔ σ'):

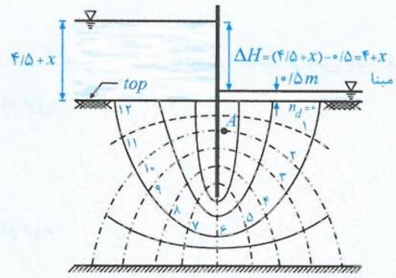
$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = ۷۳ - [\frac{۵}{۳}(۴ + x) + ۳۹] = ۳۴ - \frac{۵}{۳}(۴ + x)$$

در این سؤال از ما خواسته شده است تا x ای را بیابیم که به ازای آن تنش مؤثر در نقطهٔ A مساوی صفر شود، بنابراین می‌نویسیم:

$$\sigma'_A = ۳۴ - \frac{۵}{۳}(۴ + x) = ۰ \Rightarrow x = ۱۶/۴\ m$$

بنابراین گزینهٔ (۱) درست است.

نگاه دیگر



اگر تنش مؤثر در نقطهٔ A با x متر بالاتر رفتن آب بالادست برابر صفر شود، داریم:

$$\sigma_A = \sigma'_A + u_A \xrightarrow{\sigma'_A = ۰} \sigma_A = u_A = ۷۳\ kN/m^۲$$

$$u_A = ۷۳\ kN/m^۲ \Rightarrow h_{p_A} = \frac{u_A}{\gamma_w} = \frac{۷۳}{۱۰} = ۷/۳\ m$$

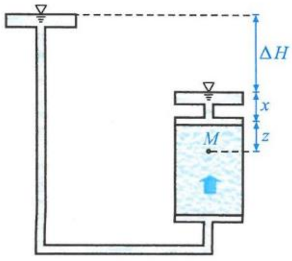
$$h_{p_A} = H_A - z_A \Rightarrow ۷/۳ = H_A - [-(۰/۵ + ۳/۴)] \Rightarrow H_A = ۳/۴\ m$$

$$H_A = H_{top} - n\Delta h \Rightarrow ۳/۴ = (۴ + x) - ۱۰ \times \frac{(۴ + x)}{۱۲} \Rightarrow x = ۱۶/۴\ m$$

قسمت چهارم (فشار تراوش و کاربرد آن در محاسبه تنش مؤثر خاک‌های دارای تراوش)

D-۱- آشنایی با مفهوم فشار تراوش

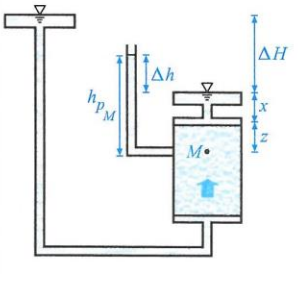
یک تودهٔ خاک اشباع را در نظر بگیرید که مطابق شکل مقابل، حرکت آب در آن از پایین به سمت بالا است:



در ادامه می‌خواهیم با بررسی چند سؤال در مورد شکل فوق، مفهوم فشار تراوش را یاد بگیریم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: اگر در نقطهٔ M یک پیزومتر قرار دهیم، در آن‌صورت چگونه می‌توان به کمک آن، فشار آب حفره‌ای در این نقطه را محاسبه کرد؟



پاسخ: اگر در نقطهٔ M پیزومتر قرار دهیم، سطح آب در آن بین سطح آب بالا دست و پایین دست می‌ایستد، به طوری‌که فاصله آن از سطح آب پایین‌دست (که بالای نقطهٔ M است) برابر Δh خواهد بود. در این شرایط فاصلهٔ سطح آب در پیزومتر تا نقطهٔ M که معرف h_p یا همان هد فشار این نقطه می‌باشد، برابر است با:

$$h_{p_M} = z + x + \Delta h$$

و در نهایت فشار نقطهٔ M برابر است با:

$$u_M = h_{p_M} \times \gamma_w = (z + x + \Delta h)\,\gamma_w$$

سؤال ۲: اگر $\Delta H = ۰$ باشد، آیا جریانی در آب برقرار می‌شود؟ در این حالت فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ M چقدر است؟

پاسخ: واضح است که در این شرایط گرادیان هیدرولیکی صفر خواهد بود و جریانی برقرار نیست:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{۰}{L} = ۰ \Rightarrow \text{جریان برقرار نیست}$$

همچنین صفر بودن ΔH به این معنی است که سطح آب بالا دست و پایین دست در یک تراز می‌ایستند و سطح آب در پیزومتر قرار گرفته در نقطهٔ M نیز با آنها یکی است، پس $\Delta h = ۰$ بوده و فشار آب حفره‌ای در این حالت برابر است با:

$$u_M = h_{z_M} \times \gamma_w = (z + x + ۰)\,\gamma_w = (z + x)\,\gamma_w$$

سؤال ۳: همانطور که مشاهده می‌کنید، فشار محاسبه شده در سؤالات (۱) و (۲) با هم متفاوت می‌باشند. این اختلاف فشار در اثر چه عاملی ایجاد می‌شود و ما آنرا چه می‌نامیم؟

پاسخ: بیایید ابتدا مقدار این اختلاف فشار را محاسبه کنیم:

$$\Delta u_M = (u_M)_{\text{تراوش}} - (u_M)_{\text{سکون}} = (z + x + \Delta h)\,\gamma_w - (z + x)\,\gamma_w = \Delta h\,\gamma_w$$

همانطور که مشاهده می‌کنید این اختلاف فشار، تفاوت فشار آب حفره‌ای در حالت سکون و تراوش است، پس می‌توانیم علت این اختلاف فشار را حرکت یا تراوش آب در خاک بدانیم. به‌همین دلیل به آن **فشار تراوش** یا **فشار نفوذ** گفته می‌شود و آن را با P نشان می‌دهیم.

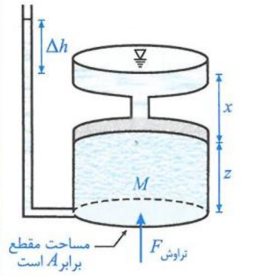
زیر شاخه‌های قسمت چهارم

D-۱- آشنایی با مفهوم فشار تراوش

D-۲- محاسبهٔ تنش مؤثر با استفاده از مفهوم فشار تراوش

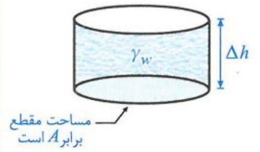
سؤال ۴: در مورد جهت و مقدار نیروی تراوش چگونه اظهار نظر می‌کنید؟

● **پاسخ:** برای پاسخ به این سؤال در تراز نقطهٔ M یک مقطع می‌زنیم و نیروی تراوش را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:



$$F_{تراوش} = P \times A = \Delta h \gamma_w \times A = \gamma_w \ \Delta h A$$

توجه: درک فیزیکی نیروی تراوش در حرکت رو به بالای آب در خاک: وزن مخزنی از آب به مساحت قاعدهٔ A و ارتفاع Δh:

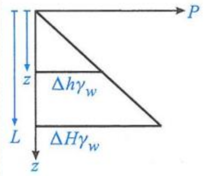


سؤال ۵: به نظر شما کمترین و بیشترین مقدار فشار تراوش در چه محل‌هایی رخ می‌دهد و چگونه می‌توان مقدار فشار تراوش را به فاصلهٔ نقطهٔ موردنظر از سطح خاک ارتباط داد؟

● **پاسخ:** برای پاسخ به این سؤال باید ببینیم پیزومتر را در چه نقاطی باید بگذاریم تا Δh مینیمم و ماکزیمم ظاهر شود. با کمی فکر متوجه می‌شویم که اگر پیزومتر در بالاترین نقطهٔ خاک قرار گیرد، سطح آب آن هم‌تراز با سطح آب بالای خاک بوده و $\Delta h = ۰$ خواهد بود. به همین ترتیب اگر پیزومتر در پایین‌ترین نقطهٔ خاک قرار گیرد، سطح آب آن، هم تراز با آب بالادست (سمت چپ) بوده و $\Delta h = \Delta H$ است که البته بیشترین مقدار برای Δh می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\begin{cases} z = ۰ \Rightarrow \Delta h = ۰ \Rightarrow P = P_{min} = ۰ \\ z = L \ (\text{طول لایه}) \Rightarrow \Delta h = \Delta H \Rightarrow P = P_{max} = \Delta H \gamma_w \end{cases}$$

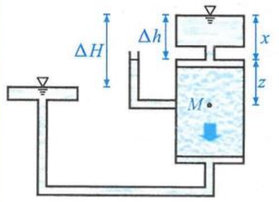
از فصل قبل می‌دانیم که تغییرات افت هد در یک خاک (با سطح مقطع ثابت) خطی است. بنابراین در اینجا نیز می‌توان تغییرات Δh در طول خاک را خطی دانست و نتیجه بگیریم که تغییرات فشار تراوش نیز در طول خاک خطی بوده و نمودار آن به‌صورت زیر است:



حال با استفاده از قضیهٔ تالس مقدار Δh را برحسب z محاسبه کرده و در رابطهٔ فشار تراوش جایگذاری می‌کنیم تا ارتباط فشار تراوش با فاصلهٔ نقطهٔ موردنظر از سطح خاک (z) را به‌دست آوریم:

$$\frac{\Delta h \gamma_w}{z} = \frac{\Delta H \gamma_w}{L} \Rightarrow \Delta h = (\frac{\Delta H}{L}) z = iz \Rightarrow \boxed{P = \Delta h \gamma_w = iz \gamma_w}$$

سؤال ۶: اگر حرکت آب در خاک از بالا به پایین باشد، فشار آب حفره‌ای و فشار تراوش چگونه محاسبه می‌شوند؟



● **پاسخ:** اگر حرکت آب در خاک از بالا به سمت پایین باشد، باز هم فشار تراوش از همان روابط قبلی محاسبه می‌شود و باز هم z فاصلهٔ نقطهٔ موردنظر از سطح خاک خواهد بود. در این شرایط مطابق شکل مقابل، فشار آب حفره‌ای برابر است با:

$$u_M = h_{p_M} \times \gamma_w = (z + x - \Delta h)\gamma_w$$

در ادامه به جمع‌بندی مطالب مطرح شده در سؤالات صفحات قبل می‌پردازیم:

۱) برای محاسبهٔ فشار تراوش در یک نقطه دو ایده مطرح است:

ایدهٔ اول: در نقطهٔ موردنظر یک پیزومتر قرار داده و فاصلهٔ سطح آب در پیزومتر تا سطح آب بالای آن نقطه (Δh) را بیابیم. سپس از حاصل‌ضرب Δh در وزن مخصوص آب، فشار تراوش را محاسبه کنیم: $P = \Delta h \, \gamma_w$

ایدهٔ دوم: ابتدا گرادیان هیدرولیکی خاکی که نقطهٔ موردنظر در آن قرار دارد را به‌دست آوریم. سپس i را در فاصلهٔ نقطه از سطح خاک (z) و وزن مخصوص آب ضرب کنیم تا فشار تراوش به‌دست آید: $P = iz \, \gamma_w$

استفاده از ایدهٔ اول کلی بوده ولی ایدهٔ دوم در خاک‌های چند لایه، کمی دردسرساز است که در تمرین‌ها به این موضوع می‌پردازیم.

۲) فشار تراوش در بالای خاک مینیمم و در پایین آن ماکزیمم است. در ضمن توزیع فشار تراوش در یک لایه خاک با سطح مقطع ثابت، مثل توزیع تنش کل، فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر، به‌صورت خطی است.

۳) نیروی تراوش در یک مقطع در جهت جریان بوده و از حاصل‌ضرب فشار تراوش در مساحت (عمود بر جریان) آن مقطع به‌دست می‌آید.

۴) ارتباط بین فشار آب حفره‌ای و فشار تراوش به هنگام حرکت آب در خاک را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

$$u = (x + z \pm \Delta h)\,\gamma_w = (x + z)\,\gamma_w \pm \Delta h\,\gamma_w$$

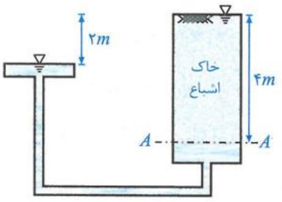
می‌دانیم $\Delta h \gamma_w$ فشار تراوش (P) بوده و $(x + z)\,\gamma_w$ فشار آب حفره ای در حالت سکون است که آن را با u^* (بخوانید یو اِستار) نشان می‌دهیم. پس می‌توان نوشت:

$$u = u^* \pm P$$

که در رابطه بالا، علامت مثبت مربوط به حرکت رو به بالای آب در خاک و علامت منفی مربوط به حرکت رو به پایین آب در خاک است.

در ادامه با حل چند تمرین، بر روی مطالب این بخش مسلط‌تر می‌شویم.

تمرین ۱۵: نیرو و فشار تراوش در مقطع $A - A$ به‌ترتیب کدام است؟ سطح مقطع نمونهٔ خاک ۲۰۰ سانتی‌متر مربع، وزن مخصوص اشباع $۲۰\,kN/m^3$ و $\gamma_w = ۱۰\,kN/m^3$ در نظر گرفته شود. (سراسری - ۹۲)



۱) $P = ۱۰\,kN/m^2$ ، $F = ۰/۴\,kN$

۲) $P = ۱۰\,kN/m^2$ ، $F = ۰/۸\,kN$

۳) $P = ۲۰\,kN/m^2$ ، $F = ۰/۸\,kN$

۴) $P = ۲۰\,kN/m^2$ ، $F = ۰/۴\,kN$

● حل: سطح آب سمت چپ (پایین‌دست) در حکم سطح آب در پیزومتری است که در مقطع $(A - A)$ قرار داده‌ایم، بنابراین فاصلهٔ آن تا سطح آب بالای خاک همان Δh است. از این رو می‌نویسیم:

$$P = \Delta h \gamma_w = ۲ \times ۱۰ = ۲۰\,kN/m^2$$

$$F = P \times A = ۲۰ \times ۲۰۰ \times 10^{-4} = ۰/۴\,kN$$

تبدیل واحد cm^2 به m^2 (برای 10^{-4})

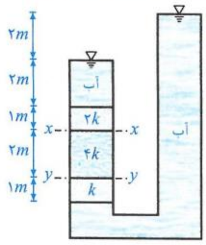
کمی خلاقیت

می‌دانیم همواره فشار از حاصل تقسیم نیرو بر مساحت به‌دست می‌آید، یعنی:

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow \frac{F}{P} = A$$

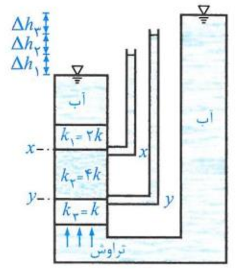
در این تست $A = ۲۰۰\,cm^2 = ۰/۰۲\,m^2$ می‌باشد و تنها در گزینهٔ (۴) است که از تقسیم F بر P به این عدد می‌رسیم. پس در حل این تست نیازی به محاسبهٔ فشار تراوش نبوده و از این طریق به سادگی می‌توانستید گزینهٔ درست را پیدا کنید.

تمرین ۱۶: در شکل مقابل فشار تراوش در مقطع $(x-x)$ و $(y-y)$ چند kN/m^2 است؟



● **حل:** برای محاسبهٔ فشار تراوش در مقاطع $(x-x)$ و $(y-y)$ کافی است تا در این مقاطع یک پیزومتر قرار دهیم و فاصلهٔ سطح آب در این پیزومترها تا سطح آب روی خاک (سطح آب پایین‌دست که در سمت چپ است) را بیابیم.

برای این منظور مطابق شکل زیر و با توجه به مطالب خوانده شده در فصل قبل، ابتدا مقادیر افت هد در هر لایه را به‌دست می‌آوریم:



$$\frac{L}{Ak}\ \text{نسبت} \Rightarrow \begin{cases} \text{لایهٔ (۱)} \Rightarrow \left(\frac{L}{Ak}\right)_1=\frac{1}{A\times 2k}=\frac{1}{2Ak}=x \\ \text{لایهٔ (۲)} \Rightarrow \left(\frac{L}{Ak}\right)_2=\frac{2}{A\times 4k}=\frac{1}{2Ak}=x \\ \text{لایهٔ (۳)} \Rightarrow \left(\frac{L}{Ak}\right)_3=\frac{1}{A\times k}=2\times\left(\frac{1}{2Ak}\right)=2x \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta h_1=\Delta h_2=\left(\frac{x}{x+x+2x}\right)\Delta H_{\text{کل}}=\frac{1}{4}\times 2=0.5\ m$$

حال برای محاسبهٔ فشار تراوش در مقاطع $(x-x)$ و $(y-y)$ به پیزومترهای قرار گرفته در این ترازها توجه کرده و با در نظر گرفتن فاصله سطح آب این پیزومترها تا سطح آب روی خاک‌ها، می‌نویسیم:

$$P_{x-x}=\Delta h_{x-x}\,\gamma_w=\Delta h_1\,\gamma_w=0.5\times 10=5\ kN/m^2$$

$$P_{y-y}=\Delta h_{y-y}\,\gamma_w=(\Delta h_1+\Delta h_2)\gamma_w=(0.5+0.5)\times 10=10\ kN/m^2$$

نگاه دیگر

برای محاسبهٔ فشار تراوش در این تمرین، می‌توانیم از ایدهٔ دوم و فرمول $P=iz\gamma_w$ نیز استفاده کنیم. به این ترتیب‌که:

در لایهٔ اول و برای محاسبهٔ P_{x-x} می‌نویسیم:

$$P_{x-x}=i_1 z\gamma_w=\frac{\Delta h_1}{L_1}\times z\times\gamma_w=\frac{0.5}{1}\times 1\times 10=5\ kN/m^2$$

اما در لایه دوم و برای محاسبهٔ P_{y-y}، علاوه بر فشار تراوشی که بر مبنای لایهٔ دوم محاسبه می‌شود، بایستی مجموع فشارهای تراوش ماکزیمم در لایه‌های بالایی را نیز لحاظ کنیم:

$$P_{y-y}=i_2 z\gamma_w+\sum\Delta h\gamma_w=i_2 z\gamma_w+\Delta h_1\gamma_w=\frac{\Delta h_2}{L_2}\times z\times\gamma_w+\Delta h_1\gamma_w=\frac{0.5}{2}\times 2\times 10+0.5\times 10=10\ kN/m^2$$

همانطور که می‌بینید، این روش برای محاسبه فشار تراوش کمی سخت‌تر است.

D-۲- محاسبهٔ تنش مؤثر با استفاده از مفهوم فشار تراوش

همانطورکه در بخش قبل $(D-1)$ دیدید، فشار آب حفره‌ای در حالت تراوش آب در خاک (رو به بالا و رو به پایین) را می‌توان به صورت زیر با فشار تراوش مرتبط کرد:

$$u=\underbrace{u^*}_{\text{فشار آب حفره‌ای در حالت سکون}}\pm\underbrace{P}_{\text{فشار تراوش}}$$

حال اگر اصل تنش مؤثر ترزاقی را بنویسیم و فشار آب حفره‌ای را از رابطهٔ بالا در آن جایگذاری کنیم، خواهیم داشت:

$$\sigma'=\sigma-u=\sigma-[u^*\pm P]=[\sigma-u^*]\mp P$$

در رابطهٔ بالا $\sigma-u^*$ که آن را با σ'^* (بخوانید سیگما پریم استار) نشان می‌دهیم، معرف تنش مؤثر در حالت بدون تراوش (حالت سکون آب) می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\boxed{\sigma'=\sigma'^*\mp P}$$

که در رابطهٔ بالا، علامت‌های منفی و مثبت به ترتیب مربوط به حرکت رو به بالا و رو به پایین آب در خاک هستند. دقت شود که در تراوش رو به بالا، جریان می‌خواهد اتصال دانه‌ها را کم کند و به همین علت تنش مؤثر به اندازهٔ P کم می‌شود و در تراوش رو به پایین، جریان آب، اتصال دانه‌ها را سفت‌تر می‌کند و در نتیجه تنش مؤثر به اندازهٔ P زیاد می‌شود.

گام‌بندی محاسبهٔ تنش مؤثر با استفاده از مفهوم فشار تراوش

برای محاسبهٔ تنش مؤثر با کمک مفهوم فشار تراوش، گام‌های زیر را طی می‌کنیم:

گام اول: ابتدا تنش مؤثر (σ') در نقطهٔ موردنظر را بدون در نظر گرفتن اثر تراوش به‌دست می‌آوریم که همان σ'^* است:

$$\sigma'^* = \sigma - u^* = \sum_{i=۱}^{n} (\gamma' z)_i$$

گام دوم: فشار تراوش (P) را براساس مطالب خوانده شده در بخش قبلی (دو ایدهٔ مطرح شده) می‌یابیم: $P = \Delta h \gamma_w = iz\gamma_w$

گام سوم: جهت تراوش در مجموعه را مشخص می‌کنیم (اینکه جریان آب در خاک رو به بالاست یا رو به پایین می‌باشد)و تنش مؤثر را طبق یکی از دو حالت زیر، محاسبه می کنیم:

حالت ۱: در تراوش رو به بالا، نیروی تراوش به سمت بالا بوده و احتمالاً همانطورکه شما نیز احساس می‌کنید، از تنش مؤثر بین دانه‌ها کم شده و خواهیم داشت:

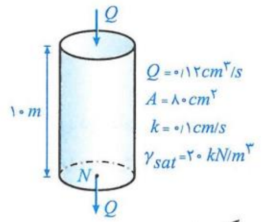
$$\sigma' = \sigma'^* - P$$

حالت ۲: در تراوش رو به پایین، نیروی تراوش به سمت پایین بوده و احتمالاً همانطورکه شما نیز احساس می‌کنید، این موضوع باعث می‌شود تا دانه‌های جامد بیشتر به هم فشار وارد کنند و تنش مؤثر بین آنها زیاد شود. در این حالت می‌توان نوشت:

$$\sigma' = \sigma'^* + P$$

در ادامه با طرح و حل دو تمرین در حالت‌های تراوش یک بعدی و دو بعدی، موضوعات فوق را بیشتر بررسی می‌کنیم.

تمرین ۱۷: باتوجه به شکل زیر، تنش مؤثر در نقطه N وقتی که حرکت آب رو به پایین می‌باشد برحسب $kN/m^۲$ کدام است؟ ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳$، سطح مقطع ثابت است و فشار آب حفره‌ای در سطح بالایی نمونه یعنی سطح ورودی آب صفر است.) (سراسری – ۸۲)



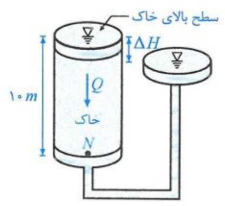
۱) $۱۰۰\ kN/m^۲$

۲) $۹۸/۵\ kN/m^۲$

۳) $۱۰۱/۵\ kN/m^۲$

۴) $۲۹۸/۵\ kN/m^۲$

حل: شاید بهتر باشد تا قبل از حل این تست، شکل واقعی‌تری (با توجه به اطلاعات صورت سؤال) برای آن رسم کنیم:



در ادامه برای محاسبهٔ تنش مؤثر، از مفهوم فشار تراوش کمک گرفته و مطابق با گام‌بندی گفته شده خواهیم داشت:

گام اول (محاسبهٔ σ'^*):

$$\sigma'^*_N = \gamma' z = (۲۰ - ۱۰) \times ۱۰ = ۱۰۰\ kN/m^۲$$

گام دوم (محاسبهٔ فشار تراوش):

$$Q = kAi \Rightarrow ۰/۱۲ = ۰/۱ \times ۸۰ \times i \Rightarrow i = ۰/۰۱۵$$ (محاسبهٔ i با کمک دبی)

$$P_N = iz\gamma_w \Rightarrow P_N = ۰/۰۱۵ \times ۱۰ \times ۱۰ = ۱/۵\ kN/m^۲$$

گام سوم (محاسبهٔ σ'):

$$\sigma' = \sigma'^* + P = ۱۰۰ + ۱/۵ = ۱۰۱/۵\ kN/m^۲$$

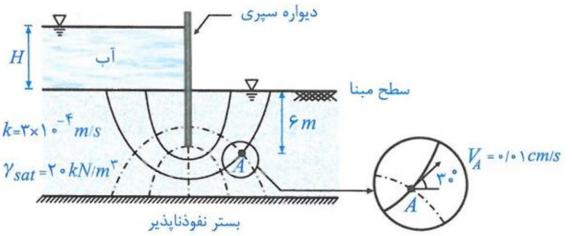
← تراوش رو به پایین است و تنش مؤثر را زیاد می‌کند.

پس گزینهٔ (۳) درست است.

تمرین ۱۸: در شکل زیر شبکهٔ جریان عبوری از زیر یک دیوارهٔ سپری نشان داده شده است. اگر سرعت جریان در نقطهٔ A برابر ۰/۰۱ سانتی‌متر در ثانیه باشد، در آن‌صورت:

الف) تنش مؤثر در نقطهٔ A را بیابید. (برحسب kPa)

ب) مقدار ارتفاع H را بر حسب متر به‌دست آورید.



حل:

الف) ابتدا با استفاده از قانون دارسی که در فصل قبل یاد گرفتیم، مقدار گرادیان هیدرولیکی در نقطهٔ A را به‌دست می‌آوریم:

$$V = ki \Rightarrow (۰/۰۱\times ۱۰^{-۲}) = (۳\times ۱۰^{-۴})\times(i) \Rightarrow i = \frac{۱}{۳}$$

در ادامه برای محاسبهٔ تنش مؤثر (قائم) در نقطهٔ A از مفهوم فشار تراوش استفاده می‌کنیم ولی به‌عنوان یک نکتهٔ بسیار مهم باید دقت شود که در محاسبهٔ تنش مؤثر با کمک فشار تراوش، بایستی از مولفهٔ قائم فشار تراوش استفاده کرده و این موضوع یعنی از i_z به‌جای i استفاده کنید:

$$P = i_z\, z\, \gamma_w \quad , \quad i_z = i \sin\alpha = \frac{۱}{۳}\times \sin ۳۰ = \frac{۱}{۶} \Rightarrow P_A = \frac{۱}{۶}\times ۶\times ۱۰ = ۱۰\, kN/m^۲$$

$$\sigma'_A = \boxed{\sigma'^{*}} - P = (۲۰-۱۰)\times ۶ - ۱۰ = ۵۰\, kN/m^۲$$
($\sigma'^{*} \to \gamma' z$)

ب) ابتدا با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی، مقدار فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A را می‌یابیم:

$$\sigma' = \boxed{\sigma} - u \Rightarrow ۵۰ = ۲۰\times ۶ - u_A \Rightarrow u_A = ۷۰\, kN/m^۲$$
($\sigma \to \gamma_{sat}\, z$)

در ادامه با توجه به مطالب خوانده شده در فصل قبل می‌نویسیم:

$$\begin{cases} u_A = h_{p_A}\times\gamma_w = (H_A - h_{z_A})\times\gamma_w \\ H_A = H_{top} - \boxed{۵}\times\Delta h = H - ۵\times\dfrac{\Delta H}{N_d} = H - ۵\times(\dfrac{H-۰}{۶}) = \dfrac{H}{۶} \\ h_{z_A} = -۶\, m \end{cases} \Rightarrow ۷۰ = [\frac{H}{۶} - (-۶)]\times ۱۰ \Rightarrow H = ۶\, m$$
(۵ ← تعداد پله‌های افت)

تذکر: در ادامهٔ این فصل و در قسمت بعد خواهید دید که محاسبهٔ تنش مؤثر بر اساس مفهوم فشار تراوش، نقش به‌سزایی در بحث پایداری خاک‌ها (به‌هنگام جوشش) ایفا می‌کند.

یکی از نگرانی‌های مهندسان ژئوتکنیک، بحث ناپایداری خاک‌ها به هنگام حضور آب در آنهاست. آب می‌تواند در زیر یک خاک ریزدانه متوقف شود و خطر بلندشدگی در آن به‌وجود آورد، یا در خاک حرکت کند و با تراوش رو به بالای خود باعث از بین رفتن مقاومت خاک گردد. در هر صورت با این اتفاقات خاک ناپایدار می‌شود که در این قسمت از فصل می‌خواهیم به موضوعات فوق بپردازیم.

E-۱- آشنایی با مفاهیم گرادیان هیدرولیکی بحرانی، جوشش و بالازدگی

برای شروع بحث پایداری خاک‌ها، ابتدا باید با سه مفهوم مهم زیر آشنا شویم:

۱- گرادیان هیدرولیکی بحرانی

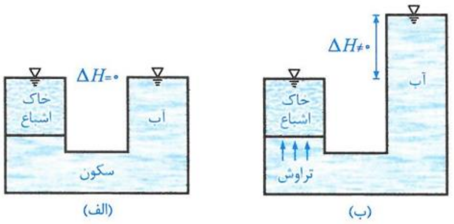
۲- جوشش در خاک

۳- بالازدگی

در ادامه به بررسی مفاهیم فوق می‌پردازیم:

۱- گرادیان هیدرولیکی بحرانی

دو شکل زیر را در نظر بگیرید که در یکی از آنها آب در خاک حرکت ندارد و ساکن است ولی در دیگری حرکت رو به بالای آب در خاک برقرار است:



(الف) (ب)

با توجه به این دو شکل، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) در شکل الف (شکل سمت چپ) که آب در خاک ساکن بوده و تراوش نداریم، تنش مؤثر به‌سادگی از رابطهٔ $\sigma' = \gamma' z$ محاسبه می‌شود.

۲) در شکل ب (شکل سمت راست) به‌دلیل تراوش رو به بالای آب در خاک، به اندازهٔ $P = iz\gamma_w$ از تنش مؤثر حالت سکون یعنی $\sigma'^* = \gamma' z$ کم می‌شود و داریم:

$$\sigma' = \sigma'^* - P = \gamma' z - iz\gamma_w$$

۳) همانطور که مشاهده می‌کنید، هرچقدر ΔH بزرگتر باشد، i نیز بزرگتر می‌شود که نتیجهٔ آن افزایش $P = iz\gamma_w$ است. حال اگر $P = iz\gamma_w$ آنقدر بزرگ شود که با $\sigma'^* = \gamma' z$ برابر شود، در آن‌صورت تنش مؤثر برابر صفر خواهد شد. گرادیان هیدرولیکی که این شرایط را به‌وجود آورده و تنش مؤثر را صفر کرده است، **گرادیان هیدرولیکی بحرانی** نام دارد که آن را با i_{cr} نمایش می‌دهیم.

۴) مقدار i_{cr} به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\sigma' = \sigma'^* - P = \gamma' z - i_{cr} z\gamma_w = 0 \Rightarrow i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1+e}$$

۵) i_{cr} بستگی به جریان ندارد و جزء مشخصات خاک به حساب می‌آید. مقدار i_{cr} حدود یک و در محدوده‌ای بین ۰/۹ تا ۱/۱ است.

زیر شاخه‌های قسمت پنجم

E-۱- آشنایی با مفاهیم گرادیان هیدرولیکی بحرانی، جوشش و بالازدگی

E-۲- تعیین ضرایب اطمینان پایداری خاک‌ها

تمرین ۱۹: در یک خاک اشباع با رطوبت ٪۲۰ و تودهٔ ویژهٔ $G_S = ۲/۵$ که در آن تراوش در راستای قائم و به سمت بالا برقرار است، گرادیان هیدرولیکی چقدر باشد تا تنش مؤثر در خاک صفر شود؟

حل: در این شرایط باید گرادیان هیدرولیکی با گرادیان هیدرولیکی بحرانی برابر شود، بنابراین می‌نویسیم:

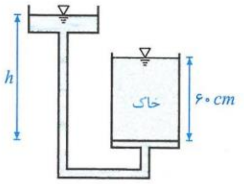
$$\begin{cases} i = i_{cr} = \dfrac{G_s - ۱}{۱+e} \\ \omega\, G_s = S_r\, e \Rightarrow ۰/۲ \times ۲/۵ = ۱ \times e \Rightarrow e = ۰/۵ \end{cases} \Rightarrow i = i_{cr} = \frac{۲/۵ - ۱}{۱ + ۰/۵} = ۱$$

۲- جوشش در خاک

ما در فصل اول با مفهوم خاک‌های اصطکاکی (فاقد چسبندگی) آشنا شدیم و دیدیم که این خاک‌ها عمدتاً شامل درشت‌دانه‌ها و ریزدانه‌هایی هستند که مقادیر قابل توجهی ماسه یا لای دارند. در خاک‌های اصطکاکی چنانچه $i = i_{cr}$ شود، مقاومت خاک از بین می‌رود* و در اصطلاح خاک دچار **جوشش** (**رگاب، روانگرایی** و در مورد ماسه‌ها به آن **پدیدهٔ ماسهٔ زنده** هم گفته می‌شود) می‌گردد.

در ادامه با حل چند تمرین متنوع، بحث جوشش در خاک را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۲۰: در مدل زیر ارتفاع آب در مخزن بالادست (h) چه مقدار تنظیم شود تا خاک اشباع در داخل استوانه با وزن مخصوص ۲/۲ تن بر مترمکعب به حالت جوشش درآید؟ (سراسری-۸۳)



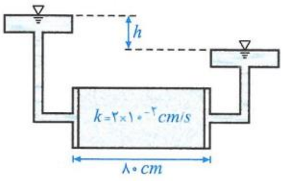
۱) ۲۳۱cm
۲) ۲۱۳cm
۳) ۱۳۲cm
۴) ۱۲۳cm

حل: برای آنکه خاک مدل در آستانهٔ جوشش قرار گیرد، بایستی تنش مؤثر برابر صفر شود. تنش مؤثر زمانی صفر می‌شود که $i = i_{cr}$ شود، بنابراین می‌نویسیم:

$$i = i_{cr} \quad , \quad i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{h - ۶۰}{۶۰} \quad , \quad i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{۲/۲ - ۱}{۱} = ۱/۲ \Rightarrow \frac{h - ۶۰}{۶۰} = ۱/۲ \Rightarrow h = ۱۳۲\,cm$$

بنابراین پاسخ صحیح گزینه (۳) است.

تمرین ۲۱: در شکل زیر اختلاف بار آبی بین ابتدا و انتهای نمونه (h) چقدر باشد تا در خاک جوشش رخ دهد؟ ($\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$ ، $\gamma_{sat} = ۲۱\,kN/m^۳$)



۱) ۸۸cm
۲) ۸۰cm
۳) ۷۲cm
۴) وقوع چنین حالتی امکان ندارد.

حل: احتمالاً می‌خواهید مانند سؤال قبل، به‌صورت زیر عمل کنید:

$$i = i_{cr} \quad , \quad i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{h}{۸۰} \quad , \quad i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{۲۱ - ۱۰}{۱۰} = ۱/۱ \Rightarrow \frac{h}{۸۰} = ۱/۱ \Rightarrow h = ۸۸\,cm$$

اما این پاسخ اشتباه است و گزینهٔ (۱) جواب درست نمی‌باشد. پس جواب درست کدام است؟

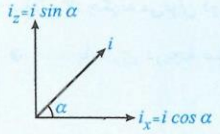
اگر درک درستی از i_{cr} داشته باشید متوجه می‌شوید که آنچه باعث صفر شدن تنش مؤثر و ایجاد جوشش در خاک می‌شود، حرکت رو به بالای آب در خاک و نیروی تراوش قائمی است که در این جهت، مقدار σ'* را کم می‌کند. در این سؤال چون تراوش افقی بوده و نیروی تراوش هیچگونه مؤلفه‌ای در امتداد قائم و به سمت بالا ندارد، بنابراین هیچگاه تنش مؤثر صفر نمی‌شود و جوشش رخ نمی‌دهد. یعنی گزینه (۴) درست است.

* در فصل هشتم می‌خوانیم که مقاومت (برشی) خاک‌ها از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

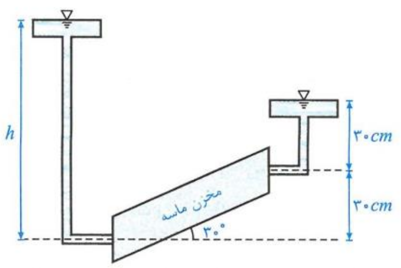
$\tau_f = \sigma' \tan\phi + C$ (ϕ = عامل اصطکاک و C = چسبندگی)

که در خاک‌های اصطکاکی که فاقد چسبندگی هستند ($C = ۰$)، با صفر شدن تنش مؤثر خواهیم داشت: $\tau_f = ۰ \times \tan\phi + ۰ = ۰$

نتیجه مهم



در یک نمونه خاک مایل آنچه می‌تواند باعث صفر شدن تنش مؤثر و ایجاد جوشش در خاک شود، مؤلفهٔ قائم (و رو به بالای) گرادیان هیدرولیکی است. بنابراین برای اینکه خاک در آستانهٔ جوشش قرار گیرد، بایستی $i_z = i_{cr}$ شود.



تمرین ۴۴: در مدل مقابل برای اینکه ماسه در داخل مخزن به حالت غوطه‌وری (روانگرایی) درآید، در صورتی‌که وزن مخصوص اشباع ماسه ۲/۱ (تن بر مترمکعب) باشد، ارتفاع آب در بالادست (h) برحسب cm چقدر می‌شود؟ (سراسری - ۸۸)

۱) ۱۲۶

۲) ۱۳۲

۳) ۱۸۶

۴) ۱۹۲

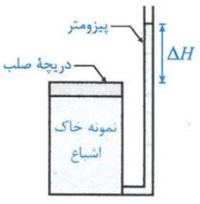
● حل: همانطور که گفتیم، آنچه باعث کاهش و صفر شدن تنش مؤثر و در نهایت جوشش در خاک می‌شود، مؤلفه قائم (و رو به بالای) گرادیان هیدرولیکی است. بنابراین می‌نویسیم:

$$\begin{cases} i_z = i\sin\alpha = (\frac{\Delta H}{L})\sin\alpha = \dfrac{(h-۶۰)}{(\frac{۳۰}{\sin ۳۰})}\times \sin ۳۰ = (\frac{h-۶۰}{۱۲۰}) \\ i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = (\frac{۲/۱-۱}{۱}) = ۱/۱ \end{cases} \Rightarrow i_z = i_{cr} \Rightarrow (\frac{h-۶۰}{۱۲۰}) = ۱/۱ \Rightarrow h = ۱۹۲cm$$

پس گزینهٔ (۴) پاسخ درست این تست است.

۳- بالازدگی

مطابق شکل زیر یک نمونه خاک اشباع را در نظر بگیرید که روی آن یک دریچهٔ صلب قرار گرفته است:



در ادامه با بررسی چند سؤال، با مفهوم **بالازدگی** آشنا می‌شویم:

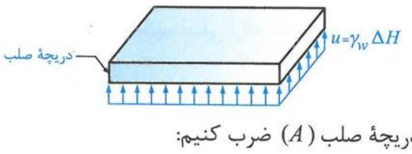
بررسی چند سوال

سؤال ۱: آیا در نمونهٔ خاک اشباع در شکل فوق، آب حرکت دارد؟

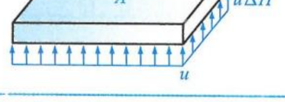
● پاسخ: خیر زیرا به علت وجود دریچهٔ صلب، جلوی حرکت آب گرفته شده و آب داخل نمونه ساکن است.

سؤال ۲: فشار آب حفره‌ای و نیروی ناشی از آن در زیر دریچه چه نام دارد و چگونه محاسبه می‌شود؟

● پاسخ: با توجه به ساکن بودن آب در خاک زیر دریچه، برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در زیر دریچه که به آن **فشار بلندکننده (uplift)** نیز گفته می‌شود، کافی است تا فاصله سطح آب در پیزومتر تا دریچه صلب (ΔH) را در وزن مخصوص آب ضرب کنیم. در این حالت نمودار توزیع فشار آب حفره‌ای در زیر دریچه صلب به شکل زیر خواهد بود:



در ادامه برای محاسبهٔ نیروی بلندکننده کافی است تا فشار بلند کننده را در مساحت دریچهٔ صلب (A) ضرب کنیم:



حجم نمودار توزیع فشار = مساحت دریچه × فشار بلندکننده = نیروی بلند کننده

سؤال ۳: چگونه می‌توان در مورد پایداری دریچهٔ صلب در برابر نیروی بلندکننده اظهار نظر کرد؟

● پاسخ: پایداری دریچهٔ صلب بستگی به وضعیت وزن دریچه نسبت به نیروی بلندکننده دارد، به این صورت که:

$$\begin{cases} \dfrac{W}{F_{\text{بلندکننده}}} > 1 \Rightarrow \text{دریچه پایدار است و در جای خود باقی می‌ماند.} & \text{یا } W > F_{\text{بلندکننده}} \\ \dfrac{W}{F_{\text{بلندکننده}}} < 1 \Rightarrow \text{دریچه ناپایدار شده و ازجای خود بلند می‌شود.} & \text{یا } W < F_{\text{بلندکننده}} \end{cases}$$

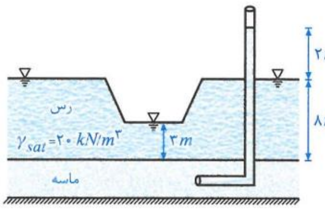
سؤال ۴: اگر به‌جای دریچهٔ صلب یک خاک ریزدانه مثل رس قرار دهید، در آن‌صورت چه اتفاقی می‌افتد؟

● پاسخ: اگر به‌جای جسم صلب، یک خاک ریزدانه داشته باشیم، در کوتاه‌مدت به‌دلیل نفوذپذیری پایین رس، آب در زیر آن متوقف شده و وضعیت مشابهی با جسم صلب را پدید می‌آورد. در این حالت احتمال بالازدگی در خاک ریزدانه وجود خواهد داشت. بدیهی است درصورت رفع خطر بالازدگی، در بلندمدت آب به درون خاک ریزدانه نفوذ کرده و درصورت چسبنده نبودن آن، مسئله جوشش مطرح شده و باید کنترل شود.

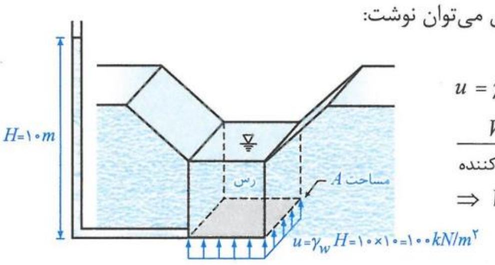
برای درک بهتر مفهوم بالازدگی، به تمرین زیر توجه کنید.

تمرین ۲۳: یک کانال آب در یک لایهٔ رسی مطابق شکل زیر احداث شده است. اگر تراز پیزومتری در لایه ماسهٔ زیر لایه رسی، ۲ متر بالاتر از سطح زمین باشد، آیا احتمال بلندشدن کف کانال به ضخامت ۳ متر وجود خواهد داشت؟ ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$)

(سراسری - ۷۹)



● حل: لایه ماسه‌ای یک لایهٔ آرتزین است که بین رس و بستر سنگی گیر افتاده است. همانطور که ملاحظه می‌کنید، تراز پیزومتری در این لایه از سطح آب محل تبعیت نمی‌کند. ما می‌دانیم که بالاترین قسمت لایهٔ آرتزین، پایین‌ترین قسمت لایهٔ رسی است و تراز پیزومتری آن، همان تراز پیزومتری لایهٔ آرتزین است. بنابراین برای کنترل بلندشدگی لایه رس می‌توان نوشت:



$$u = \gamma_w\ H = 10\times10 = 100\ kN/m^2$$

$$\frac{W}{F_{\text{بلندکننده}}} = \frac{(\gamma_{sat})(AH)}{u\times A} = \frac{(20)(A\times3)}{100\times A} = 0/6 < 1$$

$\Rightarrow W < F_{\text{بلند کننده}} \Rightarrow$ بلندشدگی رخ می‌دهد.

نتیجه

همانطور که ملاحظه می‌کنید، نسبت نیروی وزن خاک به نیروی بلندکننده، وضعیت پایداری خاک در برابر بالازدگی را مشخص می‌کند که البته می‌توان آن را به‌صورت زیر نیز نوشت:

$$\frac{W}{F_{\text{بلندکننده}}} = \frac{(\gamma_{sat})(AH)}{u\times A} = \frac{\gamma_{sat}\ H}{u} = \frac{\sigma}{u}$$

پس از یادگیری مفاهیم اصلی ارائه شده، می‌خواهیم در مورد ضریب اطمینان پایداری خاک‌ها بحث کنیم.

E-۲- تعیین ضرایب اطمینان پایداری خاک‌ها

در این بخش می‌خواهیم ضرایب اطمینان پایداری خاک‌ها در برابر جوشش و بالازدگی را تعیین کنیم و سپس نحوهٔ به‌دست آوردن ضریب اطمینان کلی را به شما یاد بدهیم. همچنین در انتهای این بخش خواهیم دید که در حالت دو بعدی (وقتی که یک شبکهٔ جریان داریم) چگونه می‌توان ضریب اطمینان پایداری خاک‌ها در برابر جوشش را تعیین کرد.

در ابتدا بحث را با بررسی چند سؤال آغاز می‌کنیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: منظور از تعیین ضریب اطمینان چیست؟

پاسخ: به‌طور کلی در مهندسی عمران ضریب اطمینان در برابر خرابی یعنی اینکه ببینیم نسبت عامل مقاوم به عامل محرک (مخرب) چقدر است؟ مثلاً ضریب اطمینان در برابر جوشش یعنی اینکه نسبت عامل مقاوم در برابر جوشش به عامل ایجاد کنندهٔ جوشش را به‌دست آوریم و یا ضریب اطمینان در برابر بالازدگی یعنی اینکه نسبت عامل مقاوم در برابر بالازدگی به عامل ایجاد بالازدگی را تعیین کنیم.

سؤال ۲: ضریب اطمینان در برابر جوشش چگونه تعیین می‌شود و در چه خاک‌هایی مورد توجه است؟

پاسخ: اگر تنش مؤثر در حالت بدون تراوش (σ'^*) را عامل مقاوم و فشار تراوش (P) را عامل به‌وجود آورندهٔ جوشش بدانیم، در آن‌صورت ضریب اطمینان در برابر جوشش به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$FS_{\text{جوشش}} = \frac{\sigma'^*}{P}$$

حال اگر این رابطه برای **یک لایه خاک** استفاده شود، در آن‌صورت خواهیم داشت:

$$FS_{\text{جوشش}} = \frac{\gamma' z}{iz\,\gamma_w} = \frac{\gamma'}{i\,\gamma_w} \xrightarrow{i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}} FS_{\text{جوشش}} = \frac{i_{cr}}{i}$$

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، جوشش در خاک‌های اصطکاکی رخ می‌دهد. بنابراین ما نیز ضریب اطمینان در برابر جوشش را در خاک‌های زیر مورد توجه قرار می‌دهیم:

۱- درشت‌دانه‌های دارای افت هد مثل ماسه

۲- ریزدانه‌های فاقد چسبندگی مثل رس سیلتی، رس شن‌دار و ...

سؤال ۳: ضریب اطمینان در برابر بالازدگی چگونه تعیین می‌شود و در چه خاک‌هایی مورد توجه است؟

پاسخ: ما در نتیجهٔ به‌دست آمده از تمرین (۲۳) دیدیم که نسبت عامل مقاوم به عامل ایجادکنندهٔ بالازدگی به‌صورت زیر است که همان ضریب اطمینان در برابر بالازدگی می‌باشد:

$$FS_{\text{بالازدگی}} = \frac{\sigma}{u}$$

همانطور که قبلاً نیز گفتیم، بالازدگی در اثر توقف آب در زیر خاک ریزدانه (که نفوذپذیری آن کم است) در کوتاه مدت اتفاق می‌افتد، بنابراین ضریب اطمینان در برابر بالازدگی فقط برای خاک‌های ریزدانه (اعم از اصطکاکی و چسبنده) تعیین می‌شود.

حال با توجه به مطالب بررسی شده در سؤالات فوق، می‌توان دستورالعمل تعیین ضریب اطمینان کلی در خاک‌ها را به‌صورت زیر ارائه کرد:

دستورالعمل تعیین ضریب اطمینان کلی در خاک‌ها

برای تعیین ضریب اطمینان کلی در یک خاک ابتدا بایستی نوع خاک مشخص شود. بسته به نوع خاک سه حالت به شرح زیر رخ می‌دهد:

حالت اول: خاک درشت دانه بوده و دارای افت هد باشد (ماسه)

در این حالت، تنها ضریب اطمینان در برابر جوشش تعیین می‌شود و همان ضریب اطمینان کلی نیز خواهد بود.

حالت دوم: خاک ریزدانه بوده و چسبنده باشد (رس)

در این حالت، تنها ضریب اطمینان در برابر بالازدگی تعیین می‌شود که این ضریب اطمینان، ضریب اطمینان کلی نیز می‌باشد.

حالت سوم: خاک ریزدانه بوده و اصطکاکی باشد (رس سیلتی، رس شن‌دار و ...)

در این حالت هم ضریب اطمینان در برابر بالازدگی و هم ضریب اطمینان در برابر جوشش مدنظر است که البته با گام‌بندی زیر می‌توانید ضریب اطمینان کلی را تعیین کنید:

گام اول: ابتدا ضریب اطمینان کوتاه مدت ($FS_{\text{بالازدگی}}$) را تعیین می‌کنیم که اگر از یک کمتر باشد، خاک ریزدانه در کوتاه مدت ناپایدار شده و اصلاً کار به جوشش در بلند مدت نمی‌رسد. پس ضریب اطمینان کلی همان ضریب اطمینان در برابر بالازدگی است. اما اگر ضریب اطمینان بالازدگی از یک بیشتر شود، در آن‌صورت خاک در کوتاه مدت پایدار بوده و به گام دوم می‌رویم تا FS در برابر جوشش را نیز تعیین کنیم.

گام دوم: ضریب اطمینان دراز مدت ($FS_{\text{جوشش}}$) را تعیین می‌کنیم که اگر از یک کمتر باشد، خاک در بلند مدت ناپایدار می‌شود و ضریب اطمینان کلی همان ضریب اطمینان در برابر جوشش خواهد بود. اما اگر این ضریب اطمینان از یک بیشتر شود، در آن‌صورت خاک در بلند مدت هم پایدار بوده و برای تعیین FS کلی به گام سوم می‌رویم.

گام سوم: ضریب اطمینان کلی را به‌صورت زیر تعیین می‌کنیم:

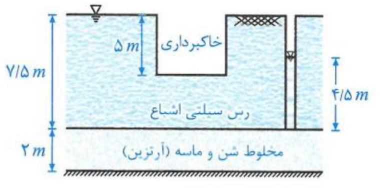
$$FS_{\text{کل}} = min\{FS_{\text{بالازدگی}} \;,\; FS_{\text{جوشش}}\}$$

اکنون بیایید با حل یک تمرین، مطالب گفته شده را مرور کنیم و محاسبهٔ ضریب اطمینان را بهتر یاد بگیریم.

تمرین ۲۴: در شکل زیر وزن مخصوص اشباع رس سیلتی برابر $\text{۲۰}\,kN/m^{\text{۳}}$ و وزن مخصوص آب برابر $\text{۱۰}\,kN/m^{\text{۳}}$ می‌باشد.

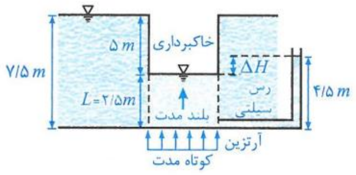
الف) ضریب اطمینان خاک‌برداری انجام شده در رس سیلتی چقدر است؟

ب) اگر یک متر دیگر خاکبرداری شود، در آن‌صورت ضریب اطمینان جدید چقدر خواهد بود؟



حل

الف) با توجه به اینکه خاک رس سیلتی یک خاک ریزدانهٔ اصطکاکی است، بنابراین حالت سوم اتفاق افتاده است و بایستی مطابق با گام‌بندی گفته شده عمل کنیم:



گام اول (تعیین ضریب اطمینان کوتاه مدت):

$$FS_{\text{بالازدگی}} = \frac{\sigma}{u} = \frac{\text{۲۰} \times \text{۲/۵}}{\text{۴/۵} \times \text{۱۰}} = \text{۱/۱} > \text{۱} \Rightarrow$$ بالازدگی اتفاق نمی‌افتد و برای کنترل جوشش به گام دوم می‌رویم.

گام دوم (تعیین ضریب اطمینان بلند مدت):

$$FS_{\text{جوشش}} = \frac{\sigma'^*}{P} = \frac{i_{cr}}{i} = \frac{(\frac{\gamma'}{\gamma_w})}{(\frac{\Delta H}{L})} = \frac{(\frac{\text{۲۰}-\text{۱۰}}{\text{۱۰}})}{(\frac{\text{۴/۵}-\text{۲/۵}}{\text{۲/۵}})} = \text{۱/۲۵} > \text{۱} \Rightarrow$$ جوشش هم رخ نمی‌دهد و برای تعیین ضریب اطمینان کلی به گام سوم می‌رویم.

گام سوم (تعیین ضریب اطمینان کلی):

$$FS_{\text{کل}} = min\{FS_{\text{بالازدگی}} \;,\; FS_{\text{جوشش}}\} = min\{\text{۱/۱} \;,\; \text{۱/۲۵}\} = \text{۱/۱}$$

ب) در این قسمت نیز مطابق با گام‌بندی گفته شده عمل می‌کنیم:

گام اول (تعیین ضریب اطمینان کوتاه مدت): با یک متر دیگر خاکبرداری $L = \text{۱/۵}\ m$ می‌شود.

$$FS_{\text{بالازدگی}} = \frac{\sigma}{u} = \frac{\text{۲۰} \times \boxed{\text{۱/۵}}}{\text{۴/۵} \times \text{۱۰}} = \text{۰/۶۷} < \text{۱}$$

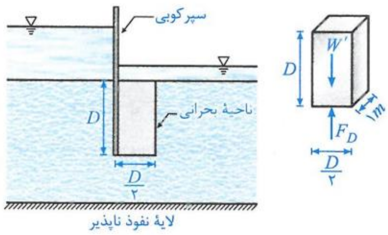
یعنی بالازدگی اتفاق افتاده است و خاک خراب می‌شود، پس در همین گام متوقف می‌شویم و خواهیم داشت:

$$FS_{\text{کل}} = FS_{\text{بالازدگی}} = \text{۰/۶۷}$$

تعیین ضریب اطمینان در برابر جوشش در تراوش دو بعدی (شبکهٔ جریان)

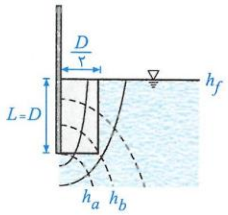
در تراوش دو بعدی، ترسیم شبکهٔ جریان به معنی حرکت آب در خاک است، پس واضح است که بحث توقف آب در کوتاه مدت و مسئله بالازدگی مطرح نیست. در تراوش دو بعدی امکان وقوع جوشش در پایین‌دست جریان، که تراوش رو به بالاست، وجود دارد. ما در اینجا می‌خواهیم شما را با دو روش محاسبه ضریب اطمینان در برابر جوشش در شبکه‌های جریان آشنا کنیم:

الف) روش ترزاقی: ترزاقی با تحقیقاتی که انجام داد متوجه شد که جوشش خاک در پایین‌دست سد یا سپر و معمولاً در فاصله $\frac{D}{2}$ از آن رخ می‌دهد (D عمق فرورفتهٔ سپر یا سد در لایهٔ نفوذپذیر است)، بنابراین لازم است تا پایداری خاک در برابر جوشش در ناحیه‌ای به عرض $\frac{D}{2}$ و ارتفاع D مورد بررسی قرار گیرد.



$$\begin{cases} FS = \dfrac{W'}{F_D} = \dfrac{\text{وزن غوطه‌ور خاک در ناحیه بحرانی (در بعد عمود بر صفحهٔ واحد)}}{\text{(نیروی تراوش) که به حجم ناحیه بحرانی وارد می‌شود.}} \\ W' = \gamma' V = (\gamma')(D \times \dfrac{D}{2} \times 1) = \dfrac{1}{2}\gamma' D^2 \\ F_D = (iz\,\gamma_w)A = (i_{ave} \times D \times \gamma_w)(\dfrac{D}{2} \times 1) = \dfrac{1}{2}\gamma_w\, D^2 i_{ave} \end{cases} \Rightarrow \boxed{FS = \dfrac{\gamma'}{i_{ave}\,\gamma_w} = \dfrac{i_{cr}}{i_{ave}}}$$

در رابطهٔ بالا i_{ave}، گرادیان هیدرولیکی متوسط می‌باشد که بر مبنای متوسط هدکل در ابتدای ناحیهٔ بحرانی به‌دست آمده است. بـرای درک بهتر مفهوم i_{ave} به شکل زیر توجه کنید:

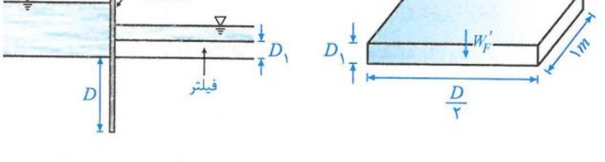


$$i_{ave} = \frac{\Delta h_{ave}}{L=D} = \frac{h_{ave} - h_f}{L=D} = \frac{(\dfrac{h_a + h_b}{2}) - h_f}{L=D} = \frac{(\dfrac{\Delta h_a + \Delta h_b}{2})}{L=D}$$

تذکر ۱: در محاسبهٔ ضریب اطمینان به روش ترزاقی، در برخی مواقع بـه‌جـای اسـتفاده از متوسـط هـدکل (h_{ave}) از هـدکل بیـشتر (h_a) استفاده می‌شود. در این شرایط که محافظه کارانه است ضریب اطمینان در برابر جوشش کمتر از حالت دقیق آن بوده و به‌صورت زیر خواهـد بود:

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{max}} < \frac{i_{cr}}{i_{ave}}$$

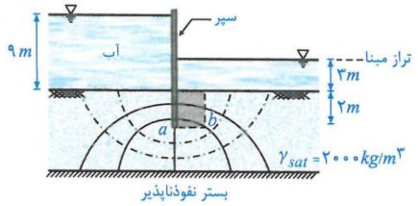
تذکر ۲: یک روش برای افزایش ضریب اطمینان در مقابل جوشش، استفاده از سربار یا مصالح فیلتر در پایین‌دست می‌باشد. فیلترها مـصالح درشت‌دانه‌ای هستند که افت انرژی به هنگام عبور جریان از آنها قابل اغماض است، بنابراین درصورت وجود فیلتر لازم به رسم مجدد شـبکه جریان نیست. اگر ضخامت لایه فیلتر برابر D_1 باشد، در آنصورت باتوجه به شکل زیر، ضریب اطمینان دربرابر جوشش را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:



$$FS = \frac{W' + W'_F}{F_D} = \frac{\frac{1}{2}\gamma' D^2 + \frac{1}{2}\gamma'_F D_1 D}{\frac{1}{2} D^2 i_{ave}\,\gamma_w} \Rightarrow \boxed{FS = \frac{\gamma' + (\frac{D_1}{D})\gamma'_F}{i_{ave}\,\gamma_w}}$$

که در رابطه فوق، γ'_F وزن مخصوص غوطه‌وری مصالح فیلتر است.

تمرین ۴۵: با توجه به شکل روبرو مطلوب است تعیین: ($ab = 1m$)



الف) ضریب اطمینان در برابر جوشش خاک در پایین‌دست سپر.

ب) ضخامت لازم برای به‌کارگیری فیلتری با $G_s = ۲/۶$ و $e = ۰/۶$ تا ضریب اطمینـــان در برابر جوشش ۲/۵ برابر شود.

● حل: چون عمق فرو رفتهٔ سپر برابر ۲ متر بوده و ab نیز برابر یک متر است، بنابراین ناحیه نشان داده شده همان ناحیهٔ بحرانی خواهد بود.

الف) با توجه به سطح مبنای نشان داده شده در شکل خواهیم داشت:

$$\begin{cases} h_a = ۶ - ۳\,\Delta h = ۶ - ۳ \times \dfrac{\Delta H}{N_d} = ۶ - ۳ \times \dfrac{۶}{۶} = ۳\ m \\ h_b = ۶ - ۴\,\Delta h = ۶ - ۴ \times \dfrac{\Delta H}{N_d} = ۶ - ۴ \times \dfrac{۶}{۶} = ۲\ m \end{cases}$$

$$\Rightarrow\ h_{ave} = \frac{h_a + h_b}{۲} = \frac{۳ + ۲}{۲} = ۲/۵\ m$$

$$i_{ave} = \frac{\Delta h_{ave}}{L} = \frac{h_{ave} - h_f}{L} = \frac{۲/۵ - ۰}{۲} = ۱/۲۵$$

$$FS = \frac{\gamma'}{i_{ave}\,\gamma_w} = \frac{(۲۰۰۰ - ۱۰۰۰)}{۱/۲۵ \times ۱۰۰۰} = ۰/۸$$

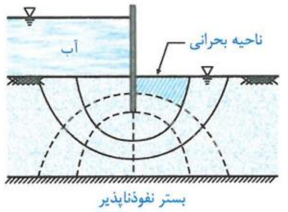
ب) ابتدا وزن مخصوص غوطه‌وری فیلتر (γ'_F) را محاسبه می‌کنیم و سپس با توجه به سایر اطلاعات، ضریب اطمینـــان در برابـر جوشــش را می‌یابیم:

$$\gamma'_F = \frac{G_s - ۱}{۱ + e}\gamma_w = \frac{۲/۶ - ۱}{۱ + ۰/۶} \times ۱۰۰۰ = ۱۰۰۰\ kg/m^۳$$

$$FS = \frac{\gamma' + (\frac{D_۱}{D})\,\gamma'_F}{i_{ave}\,\gamma_w}\ ,\ \ FS = ۲/۵ \times ۰/۸ = ۲$$

$$۲ = \frac{(۲۰۰۰ - ۱۰۰۰) + (\frac{D_۱}{۲}) \times ۱۰۰۰}{۱/۲۵ \times ۱۰۰۰}\ \Rightarrow\ D_۱ = ۳\ m$$

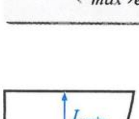
ب) روش شبکهٔ جریـان: درایـن روش اولـین سـلول بسته‌ای کـه در پـای سـپر (یا پایین‌دست هر سازه دیگری مثل سد) قرار دارد، به‌عنوان ناحیه بحرانی درنظـر گرفتـه می‌شود و لازم است تا پایداری این ناحیه دربرابر جوشش بررسی شـود. علـت انتخـاب این سلول بسته (که آن را در شکل روبرو به‌صورت هاشورزده نشان داده‌ایم) این اسـت که گرادیان هیـدرولیکی آن در مقایسـه بـا سـایر سـلول‌هـای بسـتهٔ خروجـی (یعنـی سلول‌های بسته‌ای که به سطح خاک در پایین‌دست ختم مـی‌شـوند) مـاکزیمم اسـت (زیرا طول کمتری در مقایسه با بقیه سلول‌های خروجی دارد).



برای تعیین ضریب اطمینان در برابر جوشش، مشابه با روش ترزاقی می‌نویسیم:

$$FS = \frac{\gamma'}{(i_{max})_{exit}\,\gamma_w} = \frac{i_{cr}}{(i_{max})_{exit}}$$

که در رابطهٔ بالا مقدار $(i_{max})_{exit}$ برابر است با:

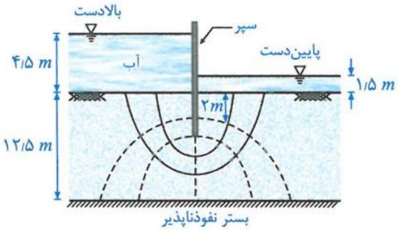


$$(i_{max})_{exit} = \frac{\Delta h}{L_{min}} = \frac{(\frac{\Delta H}{N_d})}{L_{min}}$$

تمرین ۲۶: مطابق شکل مقابل ارتفاع آب در طرفین یک دیوارهٔ سپری که به داخل ماسه فرو رفته است، به‌ترتیب $۴/۵\,m$ در بالادست و $۱/۵\,m$ در پایین‌دست است. وزن مخصوص اشباع ماسه $۲۰\,kN/m^۳$ و وزن مخصوص آب نیز $۱۰\,kN/m^۳$ می‌باشد.

الف) ضریب اطمینان در برابر جوشش چقدر است؟

ب) اگر از یک فیلتر به ضخامت ۱ متر و وزن مخصوص $۲۰\,kN/m^۳$ استفاده شود، در آنصورت ضریب اطمینان چه تغییری می‌کند؟



حل:

الف)

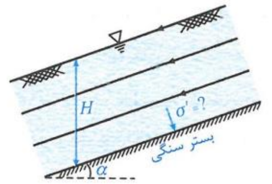
$$FS=\frac{\gamma'}{(i_{max})_{exit}\gamma_w}\quad,\quad (i_{max})_{exit}=\frac{\Delta h}{L_{min}}=\frac{(\frac{\Delta H}{N_d})}{L_{min}}=\frac{(\frac{۴/۵-۱/۵}{۶})}{۲}=۰/۲۵\Rightarrow FS=\frac{۲۰-۱۰}{۰/۲۵\times۱۰}=۴$$

ب)

$$FS=\frac{\gamma'+(\frac{D_۱}{D})\gamma'_F}{i\,\gamma_w}\quad,\quad D=\text{طول ناحیه بحرانی}\quad,\quad i=(i_{max})_{exit}$$

$$\Rightarrow FS=\frac{(۲۰-۱۰)+(\frac{۱}{۲})(۲۰-۱۰)}{۰/۲۵\times۱۰}=۶\Rightarrow$$ ضریب اطمینان $۱/۵=\frac{۶}{۴}$ برابر می‌شود.

تمرین ۴۷: در شکل زیر تنش مؤثر قائم روی بستر سنگی چقدر است؟



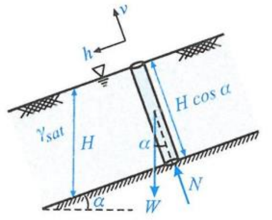
۱) $\gamma' H \cos\alpha$

۲) $\gamma' H \cos^{۲}\alpha$

۳) $(\gamma_{sat} - \gamma_w \cos^{۲}\alpha)H$

۴) $(\gamma_{sat} - \gamma_w \cos\alpha)H$

● ابتدا مقدار تنش کل (σ) را روی یک نقطه واقع بر بستر سنگی می‌یابیم:



$$\sum F_v = ۰ \Rightarrow W\cos\alpha = N$$
$$\Rightarrow (\gamma_{sat} \times H\cos\alpha \times A)\cos\alpha = N$$
$$\Rightarrow \sigma = \frac{N}{A} = \gamma_{sat} H \cos^{۲}\alpha$$

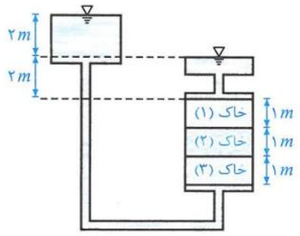
از طرفی طبق آنچه در فصل قبل یاد گرفتیم، مقدار فشار آب حفره‌ای در این نقطه برابر است با:

$$u = \gamma_w H \cos^{۲}\alpha$$

پس در نهایت با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی خواهیم داشت:

$$\sigma' = \sigma - u = \gamma_{sat} H \cos^{۲}\alpha - \gamma_w H \cos^{۲}\alpha$$
$$= (\gamma_{sat} - \gamma_w) H \cos^{۲}\alpha = \gamma' H \cos^{۲}\alpha \Rightarrow$$ گزینه (۲) صحیح است

تمرین ۴۸: اگر $P_۱$، $P_۲$ و $P_۳$ به‌ترتیب فشار نفوذ در پایین‌ترین نقطهٔ (ابتدای) خاک‌های (۱) و (۲) و (۳) باشند و داشته باشیم: $\frac{P_۱}{۴} = \frac{P_۲}{۶} = \frac{P_۳}{۷}$ در آن‌صورت، کدام‌یک از روابط زیر صحیح است؟



۱) $k_۱ = k_۲ = ۲k_۳$

۲) $k_۱ = k_۲ = ۴k_۳$

۳) $k_۱ = ۲k_۲ = ۴k_۳$

۴) $k_۳ = ۲k_۲ = ۴k_۱$

● طبق آنچه در متن درس گفته شد، فشار تراوش در پایین‌ترین قسمت یک لایه خاک، ماکزیمم مقدار موجود را دارد و از حاصل‌ضرب افت انرژی آن لایه در وزن مخصوص آب به‌دست می‌آید. پس می‌توان نوشت:

$$P_۱ = \Delta h_۱ \gamma_w$$

اما دیدیم که اگر چند لایه خاک داشته باشیم، بایستی مجموع فشارهای ماکزیمم لایه‌های بالایی را نیز با فشار تراوش لایهٔ موردنظر جمع کنیم، (تمرین ۱۶، نگاه دیگر) پس با این توضیح می‌توان گفت:

$$P_۲ = \Delta h_۲ \gamma_w + \Delta h_۱ \gamma_w = (\Delta h_۲ + \Delta h_۱)\gamma_w$$
$$P_۳ = \Delta h_۳ \gamma_w + \Delta h_۲ \gamma_w + \Delta h_۱ \gamma_w = (\Delta h_۳ + \Delta h_۲ + \Delta h_۱)\gamma_w$$

از طرفی طبق صورت سؤال داریم:

$$\frac{P_۱}{۴} = \frac{P_۲}{۶} = \frac{P_۳}{۷} \Rightarrow \frac{\Delta h_۱ \gamma_w}{۴} = \frac{(\Delta h_۱ + \Delta h_۲)\gamma_w}{۶} = \frac{(\Delta h_۱ + \Delta h_۲ + \Delta h_۳)\gamma_w}{۷}$$
$$\Rightarrow \Delta h_۱ = ۲\Delta h_۲ = ۴\Delta h_۳ \quad (I)$$ رابطه

حال با توجه به اینکه لایه‌های به‌صورت سری قرار گرفته‌اند، طبق رابطهٔ پیوستگی جریان می‌نویسیم:

$$Q_۱ = Q_۲ = Q_۳ \Rightarrow k_۱ A_۱ (\frac{\Delta h_۱}{L_۱}) = k_۲ A_۲ (\frac{\Delta h_۲}{L_۲}) = k_۳ A_۳ (\frac{\Delta h_۳}{L_۳})$$

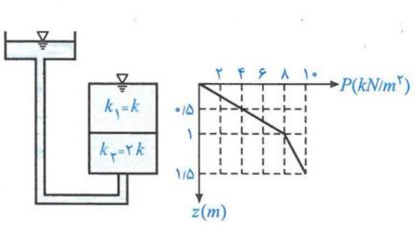
$$\xrightarrow[L_۱=L_۲=L_۳]{A_۱=A_۲=A_۳} k_۱ \Delta h_۱ = k_۲ \Delta h_۲ = k_۳ \Delta h_۳ \qquad (II) \text{ رابطه}$$

در نهایت با جایگذاری مقادیر $\Delta h_۱$ و $\Delta h_۲$ برحسب $\Delta h_۳$ از رابطه (I) در رابطه (II)، خواهیم داشت:

$$(k_۱)(۴\Delta h_۳) = (k_۲)(۲\Delta h_۳) = (k_۳)(\Delta h_۳) \Rightarrow ۴k_۱ = ۲k_۲ = k_۳$$

پس گزینه (۴) پاسخ صحیح است.

تمرین ۲۹: در شکل زیر نمودار فشار تراوش آب در طول نمونه ترسیم شده است. اگر بدانیم ضریب اطمینان در برابر جوشش در خاک (۲) برابـر ۱/۴ است و خاک (۱) در آستانه جوشش قرار دارد، نسبت وزن مخصوص اشباع خاک (۱) به خاک (۲) چقدر است؟ ($\gamma_w = ۱۰\, kN/m^۳$)



۱) $\frac{۱۱}{۹}$

۲) $\frac{۹}{۸}$

۳) $\frac{۹}{۱۱}$

۴) $\frac{۸}{۹}$

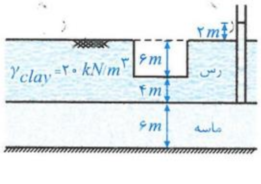
پاسخ: با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، می‌نویسیم:

$$FS_۱ = \frac{\sigma'^*}{P} = \frac{\gamma'_۱ z_۱}{P} \Rightarrow ۱ = \frac{\gamma'_۱ \times ۱}{۸} \Rightarrow \gamma'_۱ = ۸\, kN/m^۳ \Rightarrow \gamma_{sat(۱)} = \gamma'_۱ + \gamma_w = ۸ + ۱۰ = ۱۸\, kN/m^۳$$

$$FS_۲ = \frac{\sigma'^*}{P} = \frac{\gamma'_۱ z_۱ + \gamma'_۲ z_۲}{P} \Rightarrow ۱/۴ = \frac{۸ \times ۱ + \gamma'_۲ \times ۰/۵}{۱۰} \Rightarrow \gamma'_۲ = ۱۲\, kN/m^۳ \Rightarrow \gamma_{sat(۲)} = \gamma'_۲ + \gamma_w = ۱۲ + ۱۰ = ۲۲\, kN/m^۳$$

$$\frac{\gamma_{sat(۱)}}{\gamma_{sat(۲)}} = \frac{۱۸}{۲۲} = \frac{۹}{۱۱}$$

پس گزینهٔ (۳) درست است.



تمرین ۳۰: یک لایهٔ رس اشباع به ضخامت $۱۰\, m$ و وزن مخصوص $۲۰\, kN/m^۳$ برروی یک لایهٔ ماسه‌ای بـه ضخامت $۶\, m$ قرار دارد. فشار آب حفره‌ای در لایهٔ ماسه‌ای تابع سطح آب زیرزمینی در ناحیـه‌ای دورتـر و غیرمحبوس است که در آن سطح ایستابی $۲\, m$ بالاتر از سطح خاک در لایهٔ رسی است. اگر قرار باشد $۶\, m$ گودبرداری انجام دهیم، آیا مشکلی از لحاظ بالازدگی داریم؟ درصـورت وجـود مـشکل کـدام راه حـل را پیشنهاد می‌کنید؟

۱) خیر - مشکلی نداریم.

۲) بلی - $۳/۵\, m$ از خاک رس درون گودال را برمی‌داریم و به‌جای آن مصالح سنگی با وزن مخصوص $۲۵\, kN/m^۳$ پر می‌کنیم.

۳) بلی - با پمپاژ آب ارتفاع آب را در ماسهٔ غیرمحبوس ۳ متر کاهش می‌دهیم.

۴) بلی - ۲/۵ متر رس را با مصالح سنگی ($\gamma = ۳۰\, kN/m^۳$) جایگزین کرده و با پمپاژ، ارتفاع آب را ۲ متر کاهش می‌دهیم.

پاسخ: با بررسی گزینه‌ها خواهیم داشت:

۱- در وضعیت موجود ضریب اطمینان بالازدگی برابر است با:

$$FS_{\text{بالازدگی}} = \frac{\sigma}{u} = \frac{۲۰ \times ۴}{۱۰ \times ۱۲} = ۰/۶۷ < ۱ \Rightarrow$$ بالازدگی رخ می‌دهد و مشکل داریم.

۲- طبق شرایط گزینه (۲)، ضریب اطمینان بالازدگی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$FS_{\text{بالازدگی}} = \frac{\sigma}{u} = \frac{۲۵ \times ۳/۵ + ۲۰ \times ۰/۵}{۱۰ \times ۱۲} = \frac{۹۷/۵}{۱۲۰} = ۰/۸۱ < ۱ \Rightarrow$$ بالازدگی رخ می‌دهد و ایمن نیست.

۳- طبق شرایط گزینه (۳)، خواهیم داشت:

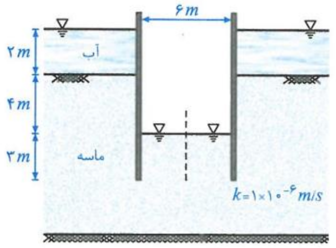
$$FS_{\text{بالازدگی}} = \frac{\sigma}{u} = \frac{۲۰ \times ۴}{۱۰ \times ۹} = ۰/۸۹ < ۱ \Rightarrow$$ بالازدگی رخ می‌دهد و ایمن نیست.

۴- باتوجه به شرایط گزینه (۴)، داریم:

$$FS_{\text{بالازدگی}} = \frac{\sigma}{u} = \frac{۳۰ \times ۲/۵ + ۲۰ \times ۱/۵}{۱۰ \times ۱۰} = \frac{۱۰۵}{۱۰۰} = ۱/۰۵ > ۱ \Rightarrow$$ ایمن است

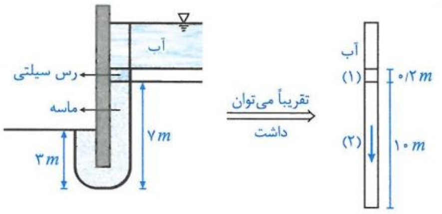
پس گزینهٔ (۴) پاسخ این تست است.

تمرین ۳۱: برای احداث پایه یک پل در بستر رودخانه لازم است تا با قراردادن دو ردیف سپر چوبی و تخلیه آب بین این دو سپر، مقدمات کار برای عملیات گودبرداری انجام شود. پس از تخلیه آب با پمپاژ، ۴ متر حفاری انجام می‌شود. اگر قبل از انجام عملیات پی‌سازیِ پایه‌های پل، یک لایه رس سیلتی به ضخامت ۲۰cm با ضریب نفوذپذیری $k = ۱ \times ۱۰^{-۸} m/s$ در بالادست رسوب کند، در آن‌صورت ضریب اطمینان گودبرداری در برابر جوشش ... .



۱) تغییر نمی‌کند.
۲) تقریباً دوبرابر می‌شود.
۳) تقریباً سه‌برابر می‌شود.
۴) تقریباً نصف می‌شود.

● حل: در این حالت مقداری از افت انرژی کلی که برابر $\Delta H = ۶m$ است به لایه رس سیلتی می‌رسد و از افت ماسه کم خواهد شد، بنابراین می‌توان نوشت:



چون لایه‌ها به‌صورت سری قرار گرفته‌اند، بنابراین برای محاسبهٔ Δh آنها داریم:

$$\text{نسبت } \frac{L}{Ak} \begin{cases} \text{لایهٔ (۱)}: (\frac{L}{Ak})_۱ = \frac{۰/۲}{A \times ۱۰^{-۸}} = \frac{۲ \times ۱۰^{۷}}{A} = ۲x \\ \text{لایهٔ (۲)}: (\frac{L}{Ak})_۲ = \frac{۱۰}{A \times ۱۰^{-۶}} = \frac{۱ \times ۱۰^{۷}}{A} = x \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta h_۱ = (\frac{۲x}{۲x + x}) \Delta H_{\text{کل}} = \frac{۲}{۳} \times ۶ = ۴\,m \quad , \quad \Delta h_۲ = \underbrace{۶}_{\Delta H_{\text{کل}}} - \underbrace{۴}_{\Delta h_۱} = ۲\,m$$

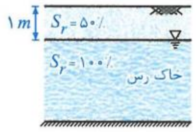
حالا برای مقایسه ضریب اطمینان در برابر جوشش (بین دو حالتِ بدون رس و با وجود رس) در پایین‌دست، با استفاده از روش شبکه جریان خواهیم داشت:

$$\frac{FS_{(۲)}}{FS_{(۱)}} = \frac{(\frac{i_{cr}}{i_{max\,(۲)}})}{(\frac{i_{cr}}{i_{max\,(۱)}})} = \frac{i_{max\,(۱)}}{i_{max\,(۲)}} = \frac{(\frac{\Delta H_۱}{L_{min}})}{(\frac{\Delta H_۲}{L_{min}})} = \frac{\Delta H_۱}{\Delta H_۲} = \frac{۶}{۲} = ۳$$

بنابراین گزینه (۳) درست است.

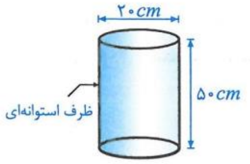
تست‌های فصل پنجم

۱- پروفیل شکل زیر مربوط به یک خاک رسی با نسبت تخلخل $e = 1$ و چگالی دانه‌های جامد $G_s = 2/7$ می‌باشد. در چه عمقی از سطح خـاک، تنش مؤثر و فشار آب حفره‌ای با هم برابرند؟ $(\gamma_w = 10\ kN/m^3)$



۱) ۵ متر
۲) ۸/۳۳ متر
۳) ۱۱/۶۷ متر
۴) وقوع چنین حالتی امکان ندارد.

۲- یک ظرف استوانه‌ای مطابق شکل زیر از ماسه خشک پر می‌شود. در این خاک نسبت تخلخل برابر ۰/۵ و چگالی دانه‌هـای جامـد $G_s = 2/5$ است. اگر ۵ لیتر آب به خاک افزوده شود، در آن‌صورت تنش مؤثر در کف ظرف چه کسری از تنش مؤثر اولیه خواهد شد؟ $(\pi = 3)$

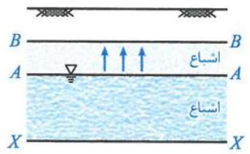


۱) $\frac{3}{5}$
۲) $\frac{2}{3}$
۳) $\frac{3}{4}$
۴) $\frac{1}{2}$

۳- در پروفیل نشان داده شده در شکل کدام جمله صحیح است؟ (سراسری - ۸۶)

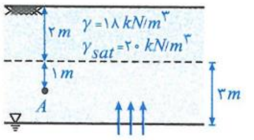
۱) وقوع مویینگی باعث افزایش تنش مؤثر در لایه شن متراکم می‌گردد.
۲) وقوع مویینگی اثری بر تنش مؤثر لایه‌های زیر سطح ایستابی ندارد.
۳) مویینگی باعث کاهش تنش مؤثر در همه لایه‌های زیر سطح $A - A$ می‌شود.
۴) مویینگی باعث افزایش تنش مؤثر در لایهٔ رسی زیر سطح $A - A$ و کاهش تنش مؤثر در لایه شن متراکم می‌شود.

۴- تحت خاصیت مویینگی آب از سطح $A - A$ (سطح آب زیرزمینی) به سطح $B - B$ رسیده است. اشباع شدن خاک تحت خاصیت مـویینگی در حد فاصل سطح $A - A$ تا $B - B$: (سراسری - ۸۵)



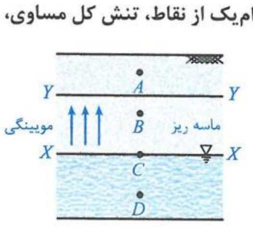
۱) باعث کاهش فشار آب حفره‌ای در سطح $X - X$ می‌شود.
۲) باعث افزایش فشار آب حفره‌ای در سطح $X - X$ می‌شود.
۳) باعث کاهش تنش مؤثر در سطح $X - X$ می‌شود.
۴) باعث افزایش تنش مؤثر در سطح $X - X$ می‌شود.

۵- اگر در اثر خاصیت مویینگی آب ۳ متر در لایه نشان داده شده بالا آمده باشد، با فرض $\gamma_w = 10\ kN/m^3$، تنش مؤثر در نقطهٔ A برابر است با: (سراسری - ۷۴)



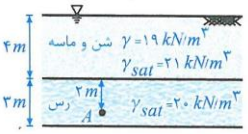
۱) $50\ kN/m^2$
۲) $76\ kN/m^2$
۳) $80\ kN/m^2$
۴) $46\ kN/m^2$

۶- دراثر خاصیت مویینگی آب از سطح $X - X$ به سطح $Y - Y$ رسیده است. به ترتیب از راست به چپ در کدام‌یک از نقاط، تنش کل مساوی، کوچکتر و بزرگتر از تنش مؤثر است؟



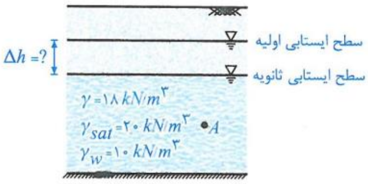
۱) C، در هیچ نقطه‌ای و D
۲) A، B و C
۳) C، در هیچ نقطه‌ای و A
۴) A، B و D

۷- اگر در شکل زیر، سطح آب ۲ متر پایین بیاید، مقدار تنش مؤثر در نقطهٔ A بلافاصله بعد از افت سطح آب و مدت مدیدی بعد از افت سطح آب، به ترتیب برابر با چند kN/m^2 خواهد شد؟



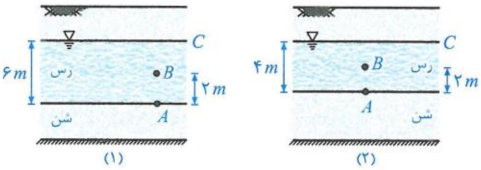
۱) ۶۴ و ۱۰۴
۲) ۸۰ و ۸۰
۳) ۶۴ و ۸۰
۴) ۸۰ و ۱۰۴

۸- در شکل زیر، افت سطح آب در لایه رس، باعث افزایش تنش مؤثر در نقطهٔ A به اندازه $20\ kN/m^2$ (بعد از مدت مدید) شده است. میزان افت سطح آب (Δh) چقدر است؟



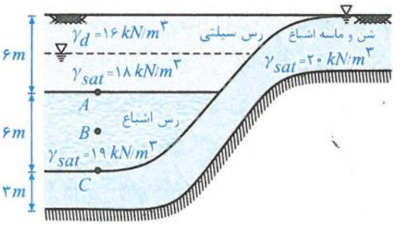
۱) ۲/۵ متر
۲) ۲ متر
۳) ۱۰ متر
۴) با اطلاعات موجود، نمی‌توان مقدار آن را محاسبه کرد.

۹- در پروفیل نشان داده شده در شکل زیر، لایهٔ شنی تحت فشار آرتزین قرار دارد. اگر ارتفاع معادل فشار آب در نقطه A در هر دو حالت برابر $20m$ باشد، نسبت فشار نقطه B در حالت اول به حالت دوم کدام است؟



۱) $\frac{3}{4}$
۲) $\frac{3}{2}$
۳) $\frac{2}{3}$
۴) $\frac{4}{3}$

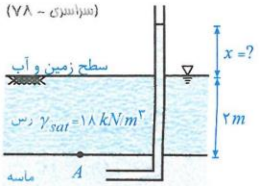
۱۰- در شکل زیر یک لایه رس اشباع به ضخامت ۶ متر بین لایه مخلوط شن و ماسه و لایه رس سیلتی قرار گرفته است. اگر تنش مؤثر در نقاط A و C به‌ترتیب $96\ kN/m^2$ و $150\ kN/m^2$ باشد، تنش مؤثر در نقطهٔ B واقع در وسط لایه رسی چقدر خواهد بود؟



۱) ۱۱۶
۲) ۱۲۰
۳) ۱۲۳
۴) هیچکدام

۱۱- مطابق شکل زیر لایهٔ ماسه‌ای در زیر یک لایهٔ رسی به ضخامت ۲ متر و وزن مخصوص اشباع $18\ kN/m^3$ قرار دارد. سطح آب در لایه رس هم‌سطح زمین است. ارتفاع آب در داخل پیزومتری که در لایه ماسه قرار دارد چند متر باید بالاتر از سطح زمین قرار گیرد، (فشار آب در ماسه افزایش یابد) تا تنش مؤثر در نقطه A، (σ'_A) صفر شود؟

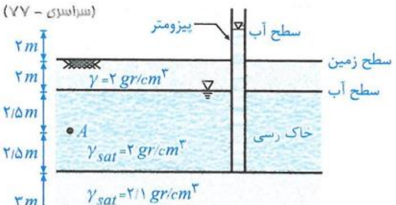
(سراسری - ۷۸)



۱) ۰/۸
۲) ۱/۵
۳) ۱/۶
۴) ۲/۵

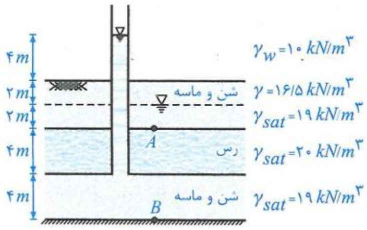
۱۲- فشار یا تنش مؤثر در نقطهٔ A چند تن بر مترمربع است؟

(سراسری - ۷۷)



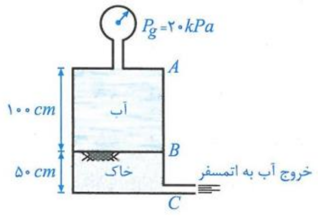
۱) ۸
۲) ۷
۳) ۶/۵
۴) ۴/۵

۱۳- باتوجه به اطلاعات داده شده در شکل زیر، تنش مؤثر در نقاط A و B به‌ترتیب کدام است؟ (از افت بار در لایه‌های شن و ماسه صرف‌نظر شود.)



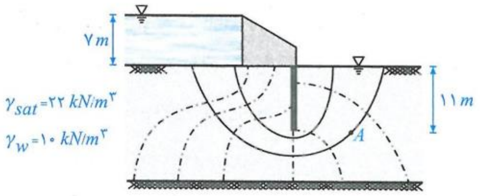
۱) ۵۱ kN/m^2 و ۶۷ kN/m^2
۲) ۶۷ kN/m^2 و ۵۱ kN/m^2
۳) ۱۲۷ kN/m^2 و ۶۷ kN/m^2
۴) ۵۱ kN/m^2 و ۱۲۷ kN/m^2

۱۴- در شکل زیر تنش مؤثر در وسط لایه BC چقدر است؟ فشارسنج عقربه‌ای عدد ۲۰kPa را نشان می‌دهد و وزن مخصوص آب و خاک اشباع به‌ترتیب ۱۰ kN/m^3 و ۱۹ kN/m^3 است.



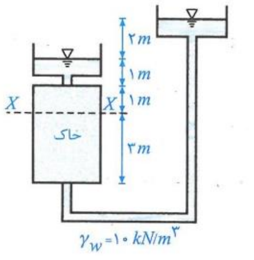
۱) ۳۴/۳۵ kN/m^2
۲) ۴۹/۳۵ kN/m^2
۳) ۱۹/۷۵ kN/m^2
۴) ۱۸/۶۵ kN/m^2

۱۵- تنش مؤثر قائم در نقطهٔ A چقدر است؟ (برحسب kN/m^2)



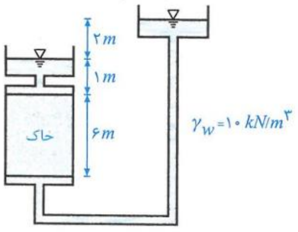
۱) ۱۱۰
۲) ۱۱۷
۳) ۱۳۷
۴) ۱۱۲

۱۶- در شکل زیر میزان تراوش آب و جهت آن در مقطع $(X-X)$ چقدر است؟ (سراسری - ۷۵)



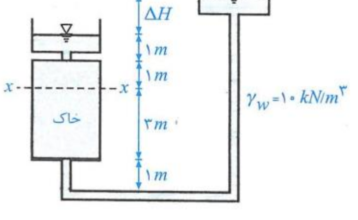
۱) ۵ kN/m^2 رو به بالا
۲) ۵ kN/m^2 رو به پایین
۳) ۱۵ kN/m^2 رو به بالا
۴) ۱۵ kN/m^2 رو به پایین

۱۷- در لایهٔ خاک نشان داده شده در شکل زیر، میزان فشار تراوش حداکثر آب ....



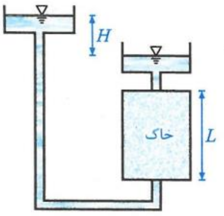
۱) برابر ۱۰ kN/m^2 است و جهت آن رو به بالا است.
۲) برابر ۱۰ kN/m^2 است و جهت آن رو به پایین است.
۳) ۲۰ kN/m^2 است و جهت آن رو به پایین است.
۴) ۲۰ kN/m^2 است و جهت آن رو به بالا است.

۱۸- در شکل زیر چنانچه فشار تراوش آب در مقطع $x-x$ برابر ۷ kN/m^2 باشد، اختلاف ارتفاع سطح آب بین ابتدا و انتهای نمونه (ΔH) چقدر است؟



۱) ۲/۱ m
۲) ۳/۵ m
۳) ۴/۲ m
۴) ۲/۸ m

۱۹- درشکل زیر L طول نمونه و H اختلاف تراز پیزومتری بین بالادست و پایین‌دست نمونه است. اگر طول نمونه دوبرابر شود و بخواهیم نیروی تراوش در واحد حجم نمونه نصف گردد، چه تغییری در مقدار H صورت می‌گیرد؟



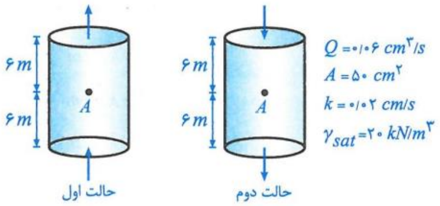
۱) تغییری در آن رخ نمی‌دهد.

۲) نصف می‌شود.

۳) $\frac{۱}{۴}$ مقدار اولیه می‌گردد.

۴) دوبرابر می‌شود.

۲۰- آب در نمونهٔ خاکی، به دو صورت مطابق شکل جریان دارد. اگر وزن مخصوص آب برابر $۱۰\ kN/m^۳$ باشد، تنش مؤثر در نقطهٔ A درحالت (۱) و (۲) به‌ترتیب برابر است با: (تنش مؤثر در سطح بالایی نمونه صفر است.)



۱) $۵۶/۴\ kN/m^۲$ و $۶۳/۶\ kN/m^۲$

۲) $۶۳/۶\ kN/m^۲$ و $۵۴/۶\ kN/m^۲$

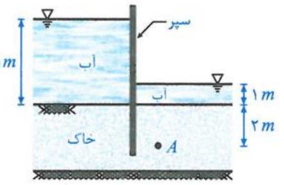
۳) $۶۳/۶\ kN/m^۲$ و $۵۶/۴\ kN/m^۲$

۴) $۵۴/۶\ kN/m^۲$ و $۶۳/۶\ kN/m^۲$

۲۱- پیزومتر سطح ایستابی آب را در نقطهٔ A، ۱/۵ متر بالاتر از سطح آب پایین‌دست سپر فلزی نشان می‌دهد. (سراسری - ۷۸)

الف) فشار تراوش در نقطهٔ A برحسب $kN/m^۲$ چقدر است؟

ب) اگر نفوذپذیری خاک ۲ برابر شود، فشار تراوش چه تغییری خواهد کرد؟



۱) الف- ۱۵، ب) دوبرابر می‌شود.

۲) الف- ۱۵، ب) تغییری نمی‌کند.

۳) الف- ۱۰، ب) تغییری نمی‌کند.

۴) الف- ۱۰، ب) دوبرابر می‌شود.

۲۲-ماسه زنده (Quick Sand) در کدامیک از حالات زیر قابل مشاهده است؟ (سراسری - ۸۶)

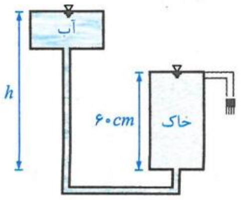
۱) جریان رو به پایین در ماسهٔ اشباع و گرادیان هیدرولیکی $i > ۱$

۲) جریان رو به بالا در ماسهٔ اشباع و گرادیان هیدرولیکی حدود $i = ۱$

۳) جریان رو به بالا در ماسهٔ اشباع و گرادیان هیدرولیکی $i < ۱$

۴) جریان رو به بالا در ماسهٔ اشباع و گرادیان هیدرولیکی $i > ۱$

۲۳- مدل نشان داده شده در شکل زیر نشت پایدار در نمونه خاک ماسه را نشان می‌دهد. خاک داخل محفظه دارای وزن واحد حجم $\gamma_{sat} = ۲۰\ kN/m^۳$ می‌باشد. مقدار h چند متر باشد تا خاک ماسه‌ای در کف ظرف به حالت جوشش (سیلان) درآید؟ ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳$) (سراسری - ۹۳)



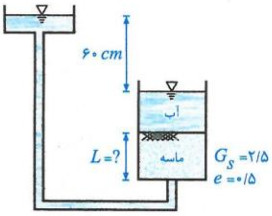
۱) ۰/۳

۲) ۱/۲

۳) ۰/۶

۴) ۲/۱

۲۴- اگر در شکل زیر ضریب اطمینان خاک ماسه‌ای در برابر جوشش مساوی ۲ درنظر گرفته شود، در آن‌صورت ضخامت لایهٔ متخلخل کدام است؟



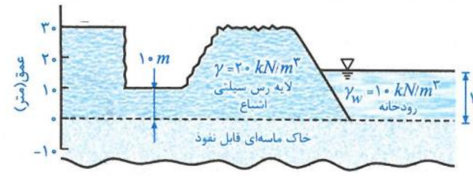
۱) ۱۲۰ cm

۲) ۶۰ cm

۳) ۳۰ cm

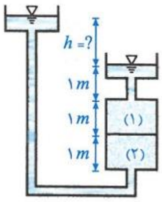
۴) ۹۰ cm

۲۵- در کف خاکبرداری زیر، ضریب اطمینان در برابر جوشش را محاسبه کنید. (فرض شود مقاومت برشی خاک وجود ندارد.) (سراسری - ۷۴)



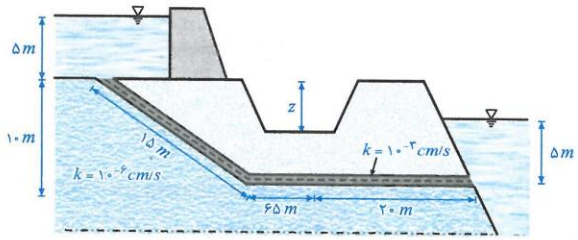
۱) ۱/۶۷
۲) ۱/۲۰
۳) ۲/۰۰
۴) ۰/۹۵

۲۶- نفوذپذیری خاک (۲)، دوبرابر نفوذپذیری خاک (۱) می‌باشد. اگر گرادیان هیدرولیکی بحرانی (i_{cr}) خاک (۱) برابر واحد باشد، تحت چه اختلاف ارتفاعی برحسب متر ($h = ?$) خاک (۱) به حالت جوشان می‌رسد؟ (سراسری - ۸۰)



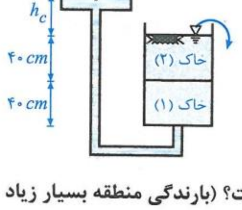
۱) ۱
۲) ۱/۳۳
۳) ۱/۵
۴) ۲

۲۷- در شکل زیر در بین لایه خاک با نفوذپذیری $۱۰^{-۶}\ cm/sec$، یک لایه خاک با نفوذپذیری $۱۰^{-۳}\ cm/sec$ قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع z در پایین‌دست سد بتنی زیر که می‌توان خاکبرداری کرد، بدون اینکه جوشش ماسه رخ دهد چقدر است؟ ($\gamma_{sat} = ۲\ gr/cm^۳$ خاک) (سراسری - ۸۳)



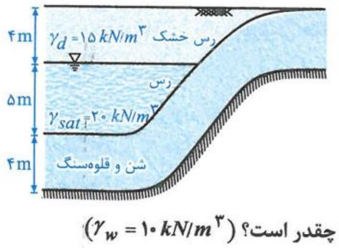
۱) ۲/۷ متر
۲) ۴/۵ متر
۳) ۵/۳ متر
۴) ۶/۵ متر

۲۸- مقدار حداقل h_c برحسب سانتی‌متر، چقدر باشد تا خاک (۲) ناپایدار (درحالت جوشش) گردد؟ در نتیجه تراوش ٪۲۰ اختلاف انرژی کل در خاک (۱) و بقیه در خاک (۲) تلف می‌شود. (برای هر دو خاک $\gamma_{sat} = ۲\gamma_w = ۲۰\ kN/m^۳$) (سراسری - ۸۴)



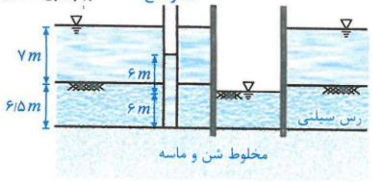
۱) ۴۰
۲) ۵۰
۳) ۵۳/۵
۴) ۶۶/۶

۲۹- در پروفیل شکل زیر با استفاده از اطلاعات داده شده، ضریب اطمینان دربرابر بالازدگی در خاک رس کدام است؟ (بارندگی منطقه بسیار زیاد است.)



۱) ۱/۸
۲) ۳/۲
۳) ۱/۲
۴) ۱/۵

۳۰- در صورتیکه وزن مخصوص اشباع خاک رس سیلتی $۱۹\ kN/m^۳$ باشد، ضریب اطمینان خاکبرداری چقدر است؟ ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳$) (سراسری - ۷۶)

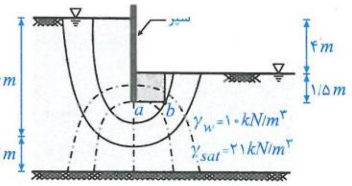


۱) $FS = ۰/۹$
۲) $FS = ۰/۹۵$
۳) $FS = ۱$
۴) $FS = ۱/۰۵$

۳۱- فیلتر به کار برده شده در پای یک سپر دارای وزن مخصوص غوطه‌وری $\gamma'_F = 2\gamma'$ (γ' وزن مخصوص غوطه‌وری لایه نفوذپذیر می‌باشد.) و ضخامتی برابر با $\frac{1}{4}$ عمق فرورفته سپر در لایه نفوذپذیر (D) می‌باشد. به‌کارگیری این فیلتر سبب می‌شود تا ضریب اطمینان دربرابر جوشش ... .

۱) ۲ برابر شود. ۲) ۱/۵ برابر شود. ۳) ۱/۲۵ برابر شود. ۴) تغییری نکند.

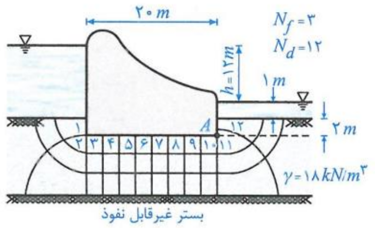
۳۲- شبکه جریان برای یک دیوار سپری، مطابق شکل زیر رسم شده است. باتوجه به اطلاعات داده شده در شکل ضریب اطمینان خاک دربرابر جوشش در ناحیه هاشورخورده چقدر است؟ $(ab = 0/75m)$



۱) ۰/۸۶
۲) ۲/۹۶
۳) ۱/۷۴
۴) ۱/۱

۳۳- در شکل زیر شبکه جریان در پی یک سد داده شده است. مقدار سربار لازم در پایین دست چقدر باشد (برحسب kN/m^2) تا ضریب اطمینان پایداری خاک در نقطه A واقع در ۲ متری سطح زمین پایین‌دست برابر ۲ باشد. وزن مخصوص آب $10\ kN/m^3$ فرض شود.

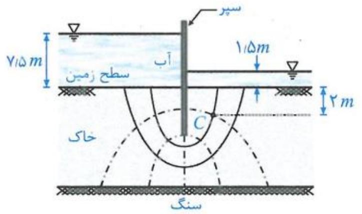
(سراسری – ۷۷)



۱) ۶
۲) ۲۲
۳) ۳۴
۴) ۴۶

۳۴- مطابق شکل ارتفاع آب در طرفین یک دیوارهٔ سپری که به داخل ماسه فرو رفته است به ترتیب ۷/۵ متر و ۱/۵ متر در بالادست و پایین‌دست دیواره است. اگر وزن واحد حجم ماسه $\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3$ و وزن مخصوص آب $\gamma_w = 10\ kN/m^3$ باشد، آیا احتمال زیرشویی (*Piping*) در پایین‌دست دیواره وجود خواهد داشت؟ و ضریب اطمینان چقدر خواهد بود؟

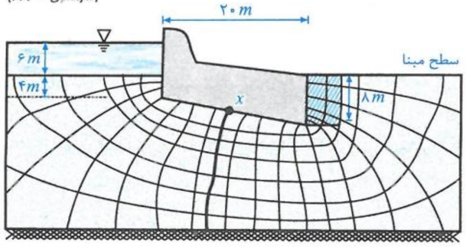
(سراسری – ۷۸)



۱) وجود دارد، $FS = 0/8$
۲) وجود دارد، $FS = 0/5$
۳) وجود ندارد، $FS = 2$
۴) وجود ندارد، $FS = 1$

۳۵- باتوجه به شکل، فشار آب (u) در نقطه x برحسب کیلونیوتن برمترمربع چقدر است؟ نقطه x درست در وسط قاعده سازه واقع شده است. ضریب اطمینان در برابر جوشش خاک در محل بحرانی مشخص شده در پایین‌دست چقدر است؟ ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$ و $\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3$)

(سراسری – ۸۷)

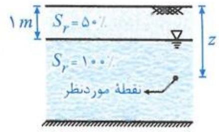


۱) $u = 96/70$ و $F = 4$
۲) $u = 83/30$ و $F = 8$
۳) $u = 83/30$ و $F = 4$
۴) $u = 96/70$ و $F = 8$

پاسخ تست‌های فصل پنجم

۱- (۳)

ابتدا عمق موردنظر را z می‌نامیم که با توجه به عدم حرکت آب در خاک، فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر در این عمق برابر می‌شوند با:



$$u=\gamma_w\,h_w=۱۰\times(z-۱)$$

$$\sigma'=\sum_{i=۱}^{۲}(\gamma' z)_i=\gamma_۱ H_۱+\gamma'_۲ H_۲$$

در ادامه $\gamma_۱$ و $\gamma'_۲$ را براساس روابط خوانده شده در فصل اول، به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\gamma_۱=\frac{G_s+\omega G_s}{۱+e}\gamma_w=\frac{G_s+S_r e}{۱+e}\gamma_w=\frac{۲/۷+۰/۵\times۱}{۱+۱}\times۱۰=۱۶\,kN/m^۳\qquad(\omega G_s=S_r e)$$

$$\gamma_۲=\frac{G_s+e}{۱+e}\gamma_w=\frac{۲/۷+۱}{۱+۱}\times۱۰=۱۸/۵\,kN/m^۳\ \Rightarrow\ \gamma'_۲=\gamma_۲-\gamma_w=۱۸/۵-۱۰=۸/۵\,kN/m^۳$$

خاک (۲) اشباع است ($\gamma_۲=\gamma_{sat}$)

حال با جایگذاری وزن مخصوص‌های به‌دست آمده در رابطهٔ تنش مؤثر، خواهیم داشت:

$$\sigma'=۱۶\times۱+۸/۵\times(z-۱)=۷/۵+۸/۵\,z$$

و در نهایت با برابر قرار دادن σ' و u (طبق خواستهٔ سؤال)، عمق z موردنظر را می‌یابیم:

$$u=\sigma'\ \Rightarrow\ ۱۰\times(z-۱)=۷/۵+۸/۵\,z\ \Rightarrow\ ۱/۵z=۱۷/۵\ \Rightarrow\ z\simeq۱۱/۶۷\,m$$

۲- (۱)

در ابتدا که ماسه خشک است، می‌توان وزن مخصوص خشک خاک و تنش مؤثر در کف ظرف را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\gamma_d=\frac{G_s\gamma_w}{۱+e}=\frac{۲/۵\times۱۰}{۱+۰/۵}=۱۶/۶۷\,kN/m^۳$$

$$\sigma'_۱=\gamma'_۱ H=\gamma_d H=۱۶/۶۷\times۰/۵=۸/۳۳\,kN/m^۲$$

حال اگر ۵ لیتر آب به ظرف اضافه کنیم، خاک ماسه‌ای تا ارتفاع مشخصی اشباع می‌شود، ولی از آن بالاتر، کماکان خشک باقی می‌ماند. برای مشخص شدن ارتفاع ناحیهٔ اشباع در خاک ماسه‌ای، V_v آن را به‌دست می‌آوریم:

$$\begin{cases}V_s+V_v=V_{\text{کل}}=\dfrac{\pi d^۲}{۴}h=\dfrac{\pi\times۲۰^۲}{۴}\times۵۰=۱۵۰۰۰\,cm^۳\\[2mm]\dfrac{V_v}{V_s}=e=۰/۵\ \Rightarrow\ V_s=۲V_v\end{cases}\Rightarrow\ ۲V_v+V_v=۱۵۰۰۰\ \Rightarrow\ V_v=۵۰۰۰\,cm^۳=۵\,lit$$

بنابراین با اضافه کردن $۵\,lit$ آب به ظرف، کل حفرات تودهٔ خاک توسط آب پر شده و تمام خاک اشباع می‌شود. در این شرایط وزن مخصوص خاک اشباع برابر است با:

$$\gamma_{sat}=\frac{G_s+e}{۱+e}\gamma_w=\frac{۲/۵+۰/۵}{۱+۰/۵}\times۱۰=۲۰\,kN/m^۳$$

واضح است که در این شرایط، تنش مؤثر در کف ظرف نیز تغییر کرده و برابر می‌شود با:

$$\sigma'_۲=\gamma'_۲ H=(۲۰-۱۰)\times۰/۵=۵\,kN/m^۲$$

و در نهایت نسبت تنش‌های مؤثر در دو حالت به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱}=\frac{۵}{۸/۳۳}=\frac{۵}{\frac{۲۵}{۳}}=\frac{۳}{۵}\qquad\left(۸/۳۳\to\frac{۲۵}{۳}\right)$$

(۱) -۳

همانطور که در متن درس گفته شده است وقوع موئینگی باعث افزایش تنش مؤثر در ناحیهٔ مویینگی و نیز ترازهای خاک در پایین آن می‌شود.

(۴) -۴

طبق مفاهیم گفته شده در مورد موئینگی:

- این پدیده، فشار آب حفره‌ای در ترازهای پایین‌تر از سطح ایستابی را تغییر نمی‌دهد، بلکه باعث کاهش (منفی شدن) فشار آب در ناحیهٔ موئینگی می‌شود.
- این پدیده، باعث افزایش تنش مؤثر در ناحیهٔ مویینگی و ترازهای پایینی آن می‌شود.

با این توضیحات گزینهٔ (۴) صحیح می‌باشد.

(۲) -۵

برای حل این تست، مشابه تمرین (۳) عمل کرده و ابتدا تنش کل در نقطهٔ A را می‌یابیم.

$$\sigma_A = \sum_{i=۱}^{۲} (\gamma z)_i = \gamma_۱ H_۱ + \gamma_۲ H_۲ = ۱۸ \times ۲ + ۲۰ \times ۱ = ۵۶\ kN/m^۲$$

حال فشار آب حفره‌ای در این نقطه را محاسبه می‌کنیم که البته می‌دانیم، چون A در ناحیهٔ مویینگی قرار دارد، $u_A < ۰$ است.

$$u_A = -\gamma_w \underbrace{z}_{\text{فاصلهٔ } A \text{ تا سطح آب زیرزمینی}} = -۱۰ \times (۳-۱) = -۲۰\ kN/m^۲$$

و در نهایت طبق اصل تنش مؤثر، می‌توان نوشت:

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = ۵۶ - (-۲۰) = ۷۶\ kN/m^۲$$

(۴) -۶

برای پاسخ به این سؤال باید σ و σ' را در نقاط داده شده مقایسه کنیم:

$$\text{نقطهٔ } A: u_A = ۰ \Rightarrow \sigma_A = \sigma'_A$$

$$\text{نقطهٔ } B: u_B < ۰ \Rightarrow \sigma_B = \sigma'_B + \underbrace{u_B}_{\text{منفی است}} \Rightarrow \sigma_B < \sigma'_B$$

$$\text{نقطهٔ } C: u_C = ۰ \Rightarrow \sigma_C = \sigma'_C$$

$$\text{نقطهٔ } D: u_D > ۰ \Rightarrow \sigma_D = \sigma'_D + u_D > \sigma'_D$$

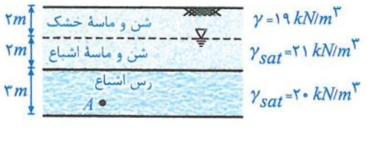
بنابراین پاسخ سؤال به‌ترتیب نقطه‌های A ، B و D بوده و گزینهٔ (۴) صحیح است.

(۳) -۷

بلافاصله پس از پایین آمدن سطح آب، تنش مؤثر هیچ تغییری نکرده و برابر همان مقدار اولیه خواهد بود.

$$\sigma'_{(t=۰)} = \sigma'_۰ = \sum_{i=۱}^{۲} \underbrace{(\gamma' z)_i}_{\text{براساس تراز ایستابی اولیه}} = \gamma'_۱ H_۱ + \gamma'_۲ H_۲ = (۲۱-۱۰) \times ۴ + (۲۰-۱۰) \times ۲ = ۶۴\ kN/m^۲$$

اما برای محاسبهٔ تنش مؤثر، مدت مدیدی پس از افت سطح آب، مشابه با تمرین (۶) می‌نویسیم:



$$\sigma'_{(t=\infty)} = \sum_{i=۱}^{۳} \underbrace{(\gamma' z)_i}_{\text{براساس تراز ایستابی جدید (مطابق شکل)}} = \gamma_۱ H_۱ + \gamma'_۲ H_۲ + \gamma'_۳ H_۳$$

$$= ۱۹ \times ۲ + (۲۱-۱۰) \times ۲ + (۲۰-۱۰) \times ۲ = ۸۰\ kN/m^۲$$

(۱) -۸

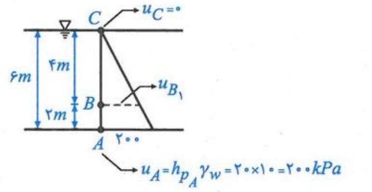
طبق نتیجهٔ به‌دست آمده از تمرین (۲) در متن درس، افزایش تنش مؤثر در نقطهٔ A از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید که با جایگذاری مقادیر داده شده در آن، به‌سادگی Δh را می‌یابیم:

$$\Delta\sigma' = \Delta h (\gamma - \gamma') \Rightarrow ۲۰ = \Delta h [۱۸ - (۲۰-۱۰)] = ۸ \Delta h \Rightarrow \Delta h = ۲/۵\ m$$

۹- (۴)

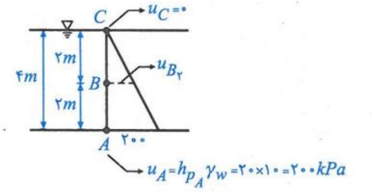
از فصل قبل می‌دانیم که در یک لایه خاک، تغییرات فشار آب حفره‌ای به‌صورت خطی است، بنابراین نمودار تغییرات فشار در دو لایه خاک داده شده به‌صورت شکل‌های زیر بوده و فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ B در هر دو شکل به‌ترتیب زیر محاسبه می‌شود.

: شکل (۱)



$$\frac{u_{B_۱}}{۲۰۰}=\frac{۴}{۶}\Rightarrow u_{B_۱}=\frac{۴۰۰}{۳}\,kPa$$

: شکل (۲)



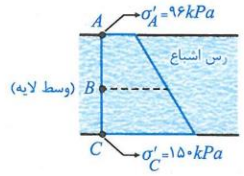
$$\frac{u_{B_۲}}{۲۰۰}=\frac{۲}{۴}\Rightarrow u_{B_۲}=۱۰۰\,kPa$$

پس در نهایت نسبت خواسته شده برابر می‌شود با:

$$\frac{u_{B_۱}}{u_{B_۲}}=\frac{\frac{۴۰۰}{۳}}{۱۰۰}=\frac{۴}{۳}$$

۱۰- (۳)

تنش مؤثر نیز مشابه با تنش کل و فشار آب حفره‌ای، در طول یک لایه خاک به‌صورت خطی تغییر می‌کند. بنابراین با رسم نمودار تغییرات σ' در طول خاک رس اشباع، به‌راحتی می‌توان σ'_B را به‌صورت زیر به‌دست آورد:



$$\sigma'_B=\frac{\sigma'_A+\sigma'_C}{۲}=\frac{۹۶+۱۵۰}{۲}=۱۲۳\,kPa$$

۱۱- (۳)

ابتدا σ'_A را با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{cases}\sigma'_A=\sigma_A-u_A\\ \sigma_A=\sum_{i=۱}^{n}(\gamma z)_i=\gamma_{sat}H=۱۸\times۲=۳۶\,kN/m^۲\\ u_A=\gamma_w\boxed{h_{p_A}}=۱۰\times(۲+x)=۲۰+۱۰x\end{cases}\Rightarrow \sigma'_A=۳۶-(۲۰+۱۰x)=۱۶-۱۰x$$

h_{p_A} ← ارتفاع آب در پیزومتر در بالای نقطهٔ A

سپس σ'_A را مساوی صفر قرار داده و x را می‌یابیم:

$$\sigma'_A=۰\Rightarrow ۱۶-۱۰x=۰\Rightarrow x=۱/۶\,m$$

۱۲- (۴)

برای محاسبهٔ تنش موثر در نقطهٔ A، از اصل تنش مؤثر ترزاقی استفاده کرده و می‌نویسیم:

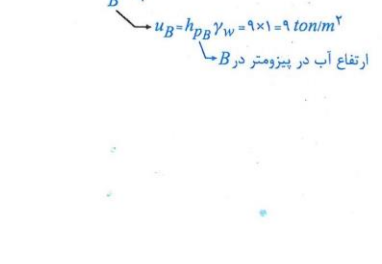
$$\sigma'_A=\sigma_A-u_A$$

اما برای محاسبه σ_A خواهیم داشت:

$$\sigma_A=\sum_{i=۱}^{۲}(\gamma z)_i=\gamma_۱H_۱+\gamma_۲H_۲=\boxed{۲}\times۲+۲\times۲/۵=۹\,t/m^۲$$

$\gamma_۱=۲\,gr/cm^۳=۲\,t/m^۳$ ←

همچنین برای محاسبهٔ u_A نیز با توجه به خطی بودن تغییرات فشار آب حفره‌ای در طول خاک، نمودار توزیع فشار را مطابق شکل زیر رسم کرده و می‌نویسیم:



$$u_A=\frac{u_B+u_C}{۲}=\frac{۹+۰}{۲}=۴/۵\,t/m^۲$$

و در نهایت تنش مؤثر در نقطهٔ A برابر می‌شود با:

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = ۹ - ۴/۵ = ۴/۵\, t/m^۲$$

توجه: چون فشار برحسب $t/m^۲$ خواسته شده بود، تمامی وزن مخصوص‌ها برحسب $t/m^۳$ (که معادل $gr/cm^۳$ است) استفاده شده‌اند.

۱۳- (۱)

با توجه به اینکه از افت بار (افت هد) در شن و ماسه صرف‌نظر شده است، می‌توان گفت تمام نقاط این لایه‌ها دارای انرژی (هد) یکسان بوده و در آنها آب جریان ندارد. لذا در لایهٔ شن و ماسهٔ بالایی خواهیم داشت:

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = (۱۶/۵ \times ۲ + ۱۹ \times ۲) - (۱۰ \times ۲) = ۵۱\, kN/m^۲$$

در نقطهٔ B نیز، جریان آب وجود ندارد که با توجه به اصل ترزاقی و نیز تراز پیزومتریک نقطهٔ B (که در داخل شن و ماسهٔ آرتزین قرار دارد) می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \sigma'_B = \sigma_B - u_B \\ \sigma_B = \sum_{i=۱}^{۴} (\gamma z)_i = \gamma_۱ H_۱ + \gamma_۲ H_۲ + \gamma_۳ H_۳ + \gamma_۴ H_۴ = ۱۶/۵ \times ۲ + ۱۹ \times ۲ + ۲۰ \times ۴ + ۱۹ \times ۴ = ۲۲۷\, kN/m^۲ \\ u_B = \gamma_w\, h_{p_B} = ۱۰ \times ۱۶ = ۱۶۰\, kN/m^۲ \end{cases}$$

$$\Rightarrow\ \sigma'_B = ۲۲۷ - ۱۶۰ = ۶۷\, kN/m^۲$$

۱۴- (۳)

به‌منظور محاسبهٔ تنش مؤثر در نقطهٔ قرار گرفته در وسط B و C (که آن را M می‌نامیم)، از اصل تنش مؤثر ترزاقی استفاده کرده و به‌ترتیب زیر عمل می‌کنیم.

$$\sigma'_M = \sigma_M - u_M$$

الف) ابتدا تنش کل در نقطهٔ M را می‌یابیم:

$$\sigma_M = \sum_{i=۱}^{۲} (\gamma z)_i + P_g = \gamma_w\, H_۱ + \gamma_{sat}\, H_۲ + P_g = ۱۰ \times ۱ + ۱۹ \times ۰/۲۵ + ۲۰ = ۳۴/۷۵\, kN/m^۲$$

(P_g: فشار وارد شده بر بالای ظرف)

ب) سپس فشار آب حفره‌ای را در این نقطه به‌دست می‌آوریم که برای این کار از خطی بودن تغییرات فشار آب حفره‌ای در طول خاک استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\begin{cases} u_M = \dfrac{u_B + u_C}{۲} \quad (M\text{: وسط لایهٔ خاک}) \\ u_B = P_g + \gamma_w\, H_w = ۲۰ + ۱۰ \times ۱ = ۳۰\, kN/m^۲ \ ,\ u_C = ۰ \ \text{(تخلیه به اتمسفر)} \end{cases} \Rightarrow\ u_M = \frac{۳۰ + ۰}{۲} = ۱۵\, kN/m^۲$$

ج) در نهایت تنش مؤثر در نقطهٔ M (وسط لایهٔ خاک) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma'_M = \sigma_M - u_M = ۳۴/۷۵ - ۱۵ = ۱۹/۷۵\, kN/m^۲$$

۱۵- (۲)

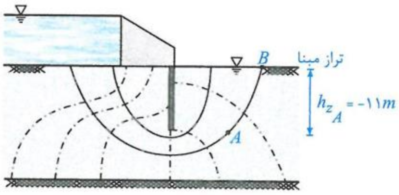
مشابه با تست‌های قبل، اینجا نیز برای به‌دست آوردن تنش مؤثر قائم در نقطهٔ A، از اصل تنش مؤثر ترزاقی استفاده می‌کنیم.

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A$$

تنش کل در نقطهٔ A به‌سادگی قابل محاسبه بوده و برابر است با:

$$\sigma_A = \gamma_{sat} H = ۲۲ \times ۱۱ = ۲۴۲\, kN/m^۲$$

جهت محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در این نقطه نیز ابتدا تراز مبنا را روی سطح آب پایین‌دست در نظر گرفته و سپس به‌صورت زیر H_A (هد کل نقطه A) و h_{z_A} را به‌دست می‌آوریم:



$$H_A - ۱/۵\Delta h = H_B \ \Rightarrow\ H_A - ۱/۵ \times \frac{۷}{۷} = ۰ \ \Rightarrow\ H_A = ۱/۵\, m$$

($۱/۵\Delta h$: از A تا B، ۱/۵ پله افت داریم؛ H_B: ۰ = فاصلهٔ تراز پیزومتری B تا تراز مبنا)

$$h_{z_A} = -۱۱\, m \ ,\ H_A = h_{p_A} + h_{z_A} \ \Rightarrow\ ۱/۵ = h_{p_A} + (-۱۱) \ \Rightarrow\ h_{p_A} = ۱۲/۵\, m$$

$$\Rightarrow\ u_A = h_{p_A}\, \gamma_w = ۱۲/۵ \times ۱۰ = ۱۲۵\, kN/m^۲$$

در نهایت هم تنش مؤثر در نقطهٔ A به‌صورت مقابل به‌دست می‌آید:

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = ۲۴۲ - ۱۲۵ = ۱۱۷\, kN/m^۲$$

۱۶- (۱)

تراز پیزومتریک در پایین نمونهٔ خاک، بیشتر از بالای آن است و این یعنی هد پایین خاک از هد بالای آن بیشتر بوده و جهت تراوش آب در خاک از پایین به بالاست. همچنین مقدار فشار تراوش در تراز موردنظر را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\begin{cases} P = iz\gamma_w \\ i = \dfrac{\Delta H_{\text{کل}}}{L} = \dfrac{۲}{۴} = ۰/۵ \end{cases} \Rightarrow P = ۰/۵ \times ۱ \times ۱۰ = ۵\ kN/m^۲$$

۱۷- (۴)

مشابه تست قبل هد کل در پایین خاک، بیشتر از هد کل در بالای آن است، پس جهت تراوش از پایین به بالا خواهد بود. همچنین طبق رابطهٔ $P = iz\gamma_w$، چون i و γ_w در طول خاک ثابت‌اند، هر چه z (فاصلهٔ نقطه از سطح خاک) بیشتر باشد، فشار تراوش نیز بیشتر می‌شود، بنابراین P_{max} در کف نمونه اتفاق می‌افتد و برابر است با:

$$\begin{cases} P_{max} = iz_{max}\gamma_w \\ i = \dfrac{\Delta H_{\text{کل}}}{L} = \dfrac{۲}{۶} = \dfrac{۱}{۳} \end{cases} \Rightarrow P_{max} = \dfrac{۱}{۳} \times ۶ \times ۱۰ = ۲۰\ kN/m^۲$$

۱۸- (۴)

ابتدا رابطهٔ فشار تراوش در مقطع $x-x$ را نوشته و از آنجا i را می‌یابیم:

$$P = iz\gamma_w \Rightarrow ۷ = i \times ۱ \times ۱۰ \Rightarrow i = ۰/۷$$

سپس به‌سادگی مقدار $\Delta H_{\text{کل}}$ محاسبه می‌شود.

$$i = \frac{\Delta H_{\text{کل}}}{L} \Rightarrow ۰/۷ = \frac{\Delta H}{۴} \Rightarrow \Delta H = ۲/۸\ m$$

۱۹- (۱)

نیروی تراوش در واحد حجم نمونه را با J_s نشان می‌دهیم که به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$J_s = \frac{F_{\text{تراوش}}}{\underbrace{\forall}_{\text{حجم خاک}}} = \frac{P_{\text{تراوش}} \times A}{z \times A} = \frac{P}{z} = \frac{iz\gamma_w}{z} \Rightarrow J_s = i\gamma_w = \left(\frac{\Delta H}{L}\right)\gamma_w$$

حال اگر رابطهٔ فوق را برای یک خاک در دو حالت مختلف بخواهیم، می‌توان نوشت:

$$\frac{J_{s_۲}}{J_{s_۱}} = \left(\frac{\Delta H_۲}{\Delta H_۱}\right)\frac{L_۱}{L_۲} \Rightarrow \frac{\Delta H_۲}{\Delta H_۱} = \left(\frac{J_{s_۲}}{J_{s_۱}}\right)\frac{L_۲}{L_۱}$$

و در ادامه برای این سؤال، داریم:

$$\frac{\Delta H_۲}{\Delta H_۱} = \frac{۱}{۲} \times ۲ = ۱$$

به عبارت دیگر می‌توان گفت، با دو برابر کردن طول نمونه، بدون تغییر در مقدار H، J_s نصف می‌شود.

۲۰- (۳)

تنش مؤثر در نقطهٔ A برای این دو نمونه به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

حالت اول: $\sigma'_{A_۱} = \sigma'^*_A \underbrace{-}_{\text{تراوش رو به بالا}} P_A$ حالت دوم: $\sigma'_{A_۲} = \sigma'^*_A \underbrace{+}_{\text{تراوش رو به پایین}} P_A$

که در هر دو نمونه، σ'^*_A یعنی تنش مؤثر بدون در نظر گرفتن اثر تراوش، برابر است با:

$$\sigma'^*_A = \gamma' H = (۲۰-۱۰) \times ۶ = ۶۰\ kN/m^۲$$

همچنین فشار تراوش نیز به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} P = iz\gamma_w \\ Q = VA = kiA \Rightarrow i = \dfrac{Q}{kA} \xrightarrow{\text{و } k \text{ و } A \text{ در هر دو نمونه یکسانند } Q} i_۱ = i_۲ = \dfrac{۰/۰۶}{۵۰ \times ۰/۰۲} = ۰/۰۶ \end{cases}$$

$$\Rightarrow P_{A_۱} = P_{A_۲} = ۰/۰۶ \times ۶ \times ۱۰ = ۳/۶\ kN/m^۲$$

پس در نهایت تنش مؤثر در نقطهٔ A در دو حالت خواسته شده برابر می‌شود با:

$$\sigma'_{A_۱} = \sigma'^*_A - P_A = ۶۰ - ۳/۶ = ۵۶/۴\ kN/m^۲$$

$$\sigma'_{A_۲} = \sigma'^*_A + P_A = ۶۰ + ۳/۶ = ۶۳/۶\ kN/m^۲$$

۲۱- (۲)

فشار تراوش از رابطهٔ $P = iz\gamma_w$ به‌دست می‌آید، بنابراین در ابتدا باید گرادیان هیدرولیکی (i) را محاسبه کنیم.

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

همانطور که در صورت سؤال گفته شده است، تراز پیزومتری در نقطهٔ A، $1/5\ m$ بالاتر از سطح ایستابی پایین‌دست است، بنابراین اختلاف تراز پیزومتری نقطهٔ A تا سطح خاک بالای خود $\Delta H = 1/5\ m$ می‌باشد. از این‌رو می‌نویسیم:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{1/5}{2} = 0/75$$

بنابراین فشار تراوش در نقطهٔ A برابر می‌شود با:

$$P_A = iz_A\gamma_w = 0/75 \times 2 \times 10 = 15\ kN/m^2$$

همچنین با تغییر نفوذپذیری، دبی جریان زیاد شده ولی مقادیر گرادیان هیدرولیکی و فشار تراوش تغییری نمی‌کنند.

۲۲- (۲)

طبق تعریف، پدیدهٔ ماسهٔ زنده هنگامی اتفاق می‌افتد که ماسه به حالت جوشش رسیده باشد، یعنی $i = i_{cr}$ شده باشد. از طرفی $i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \simeq 1$ (بین ۰/۹ تا ۱/۱) است، بنابراین می‌توان گفت به‌ازاء $i \simeq 1$ (البته در تراوش رو به بالا) ماسه به جوشش رسیده و پدیدهٔ «ماسهٔ زنده» قابل مشاهده است.

۲۳- (۲)

شرط جوشش آن است که $i = i_{cr}$ شود، بنابراین می‌نویسیم:

$$\begin{cases} i = i_{cr} \\ i = \frac{\Delta H}{L} = (\frac{h-60}{60}) \\ i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = (\frac{20-10}{10}) = 1 \end{cases} \Rightarrow (\frac{h-60}{60}) = 1 \Rightarrow h = 120\ cm = 1/2\ m$$

۲۴- (۱)

طبق تعریف ضریب اطمینان در برابر جوشش، داریم:

$$FS_{\text{جوشش}} = \frac{i_{cr}}{i}$$

که i_{cr} و i به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$\begin{cases} i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad , \quad \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \\ \gamma_{sat} = (\frac{G_s + e}{1+e})\gamma_w = \frac{2/5 + 0/5}{1 + 0/5} \times 10 = 20\ kN/m^3 \Rightarrow \gamma' = 20 - 10 = 10\ kN/m^3 \end{cases} \Rightarrow i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{10}{10} = 1$$

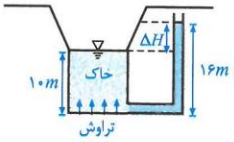
$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{0/6}{L}$$

حال اگر بخواهیم ضریب اطمینان در مقابل جوشش $FS = 2$ به‌دست بیاید، L لازم برای این منظور به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$2 = \frac{1}{(\frac{0/6}{L})} \Rightarrow L = 1/2\ m = 120\ cm$$

۲۵- (۱)

توجه کنید که لایهٔ ماسه‌ای قابل نفوذ زیرین، لایهٔ آرتزین بوده که تراز پیزومتری آن توسط رودخانه به‌دست می‌آید. حال با در نظر گرفتن این موضوع ضریب اطمینان در مقابل جوشش در رس سیلتی را می‌یابیم:



$$\begin{cases} FS_{\text{جوشش}} = \frac{i_{cr}}{i} \\ i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{20-10}{10} = 1 \\ i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{16-10}{10} = 0/6 \end{cases} \Rightarrow FS_{\text{جوشش}} = \frac{1}{0/6} = 1/67$$

۲۶- (۳)

برای آنکه خاک (۱) به جوشش برسد، باید ضریب اطمینان در برابر جوشش برای این لایه مساوی یک شود.

$$FS_{\text{جوشش}} = \frac{i_{cr_1}}{i_1} = 1 \Rightarrow i_1 = i_{cr_1} \xrightarrow[i_{cr_1}=1]{\text{طبق صورت سؤال}} i_1 = 1$$

$$i_1 = \frac{\Delta h_1}{L_1} = 1 \Rightarrow \Delta h_1 = L_1 = 1\,m$$

حال با استفاده از رابطهٔ افت هد در خاک‌های سری (طبق مطالب فصل قبل)، خواهیم داشت:

$$\text{نسبت}\ \frac{L}{Ak}\begin{cases}\text{خاک (۱)}: (\frac{L}{kA})_1 = \frac{1}{k_1 A} = 2x \\ \text{خاک (۲)}: (\frac{L}{kA})_2 = \frac{1}{k_2 A} \xrightarrow{k_2 = 2k_1} (\frac{L}{kA})_2 = \frac{1}{2k_1 A} = x\end{cases}$$

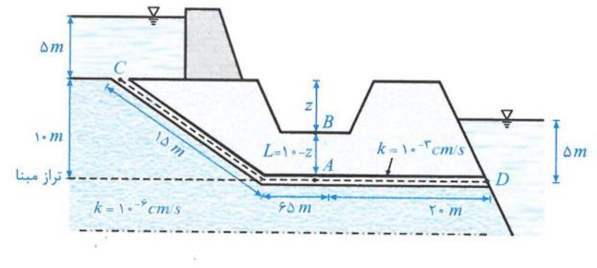
$$\Delta h_1 = \frac{2x}{2x + x}\Delta H_{\text{کل}} \Rightarrow 1 = \frac{2}{3} \times h \Rightarrow h = 1/5\,m$$

۲۷- (۴)

برای آنکه در زیر ناحیهٔ گودبرداری شده، جوشش رخ ندهد باید $FS_{\text{جوشش}} \geq 1$ شود، بنابراین می‌نویسیم:

$$\begin{cases} FS_{\text{جوشش}} = \frac{i_{cr}}{i} \geq 1 \\ i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{2-1}{1} = 1 \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{i} \geq 1 \Rightarrow i \leq 1$$

حال به محاسبهٔ i (گرادیان هیدرولیکی در خاکِ زیر ناحیهٔ گودبرداری) می‌پردازیم ($i = \frac{\Delta H}{L}$) که برای شروع، ابتدا تراز مبنا را مطابق شکل زیر در نظر گرفته و سپس نقاط A، B، C و D را به‌صورت نشان داده شده، روی این شکل مشخص می‌کنیم. ΔH افت انرژی بین نقـاط A و B است، پس می‌نویسیم:



$$\Delta H = \Delta H_{AB} = H_A - H_B$$

$$H_B = \text{فاصلهٔ تراز پیزومتری } B \text{ از تراز مبنا} = 10 - z$$

$$H_A = H_D + \Delta H_{AD}$$

$$H_D = \text{فاصلهٔ تراز پیزومتری } D \text{ تا تراز مبنا} = 5\,m$$

اما با توجه به آنکه جنس خاک از C تا D تغییر نکرده است، ΔH_{AD} به‌صورت کسری از ΔH_{CD} و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta H_{AD} = \frac{L_{AD}}{L_{CD}} \times \Delta H_{CD} = \frac{20}{15+65+20} \times [(10+5)-5] = 2\,m$$

(ΔH_{CD}: اختلاف تراز پیزومتری C و D)

بنابراین H_A و از آنجا ΔH_{AB} برابر می‌شوند با:

$$H_A = H_D + \Delta H_{AD} = 5 + 2 = 7m \Rightarrow \Delta H_{AB} = H_A - H_B = 7 - (10 - z) = z - 3$$

در نهایت نیز با جایگذاری مقدار ΔH_{AB} در رابطهٔ گرادیان هیدرولیکی ($i = \frac{\Delta H}{L}$)، مقدار i به‌دست می‌آید:

$$i = \frac{\Delta H_{AB}}{L_{AB}} = \frac{z-3}{10-z}$$

حال i بایستی کوچکتر یا مساوی یک باشد، پس می‌نویسیم:

$$i \leq 1 \Rightarrow \frac{z-3}{10-z} \leq 1 \Rightarrow z \leq 6/5\,m$$

۲۸- (۲)

این سؤال تقریباً مشابه تست (۲۶) می‌باشد و برای آنکه خاک (۲) ناپایدار گردد، باید $FS_{\text{جوشش}}=1$ شود.

$$\begin{cases} FS_{\text{جوشش}}=\dfrac{i_{cr}}{i_2}=1 \Rightarrow i_2=i_{cr} \\ i_{cr}=\dfrac{\gamma'}{\gamma_w}=\dfrac{20-10}{10}=1 \end{cases} \Rightarrow i_2=1 \Rightarrow \dfrac{\Delta h_2}{\underbrace{L_2}_{40\,cm}}=1 \Rightarrow \Delta h_2=40\,cm$$

از طرفی طبق صورت سؤال ٪۲۰ از تلفات انرژی در خاک (۱) رخ می‌دهد، یعنی $\Delta h_1=0/2\,\Delta H_{\text{کل}}$ است. بنابراین $\Delta h_2=0/8\,\Delta H_{\text{کل}}$ بوده و خواهیم داشت:

$$\Delta h_2=0/8\,\Delta H_{\text{کل}} \xrightarrow{\Delta H_{\text{کل}}=h_c} 40=0/8\,h_c \Rightarrow h_c=\frac{40}{0/8}=50\,cm$$

۲۹- (۱)

ضریب اطمینان در مقابل بالازدگی برابر است با:

$$\begin{cases} FS_{\text{بالازدگی}}=\dfrac{\sigma}{u} \\ \sigma=\sum_{i=1}^{2}(\gamma z)_i=\gamma_d\,H_1+\gamma_{sat}\,H_2=15\times 4+20\times 5=160\,kN/m^2 \\ u=\gamma_w\,h_w=10\times(5+4)=90\,kN/m^2 \end{cases} \Rightarrow FS_{\text{بالازدگی}}=\frac{160}{90}=1/77\simeq 1/8$$

توجه: لایهٔ شن و قلوه سنگ، یک لایه آرتزین بوده و تراز پیزومتری آن از ناحیه‌ای دورتر (سمت راست شکل) قرائت می‌شود. با توجه به بارندگی زیاد منطقه، سطح آب در این لایه بر سطح زمین منطبق است و به همین علت $h_w=5+4=9\,m$ در نظر گرفته شده است.

۳۰- (۲)

خاک منطقه رس سیلتی (ریزدانهٔ اصطکاکی) است، بنابراین مشابه تمرین (۲۴) به منظور تعیین ضریب اطمینان گودبرداری، با روش گام‌به‌گام پیش می‌رویم.

گام اول (تعیین ضریب اطمینان کوتاه مدت):

$$FS_{\text{بالازدگی}}=\frac{\sigma}{u}=\frac{6\times 19}{12\times 10}=0/95<1$$

چون $FS<1$ شده است، بالازدگی اتفاق می‌افتد و خاک ناپایدار می‌شود. در این شرایط اصلاً بحث جوشش (در بلند مدت) مطرح نشده و در همین گام متوقف می‌شویم. در نتیجه $FS=0/95$ خواهد بود.

۳۱- (۲)

ضریب اطمینان در مقابل جوشش را در دو حالت با فیلتر و بدون فیلتر به‌دست آورده و با هم مقایسه می‌کنیم:

$$\begin{cases} FS_{\text{بدون فیلتر}}=\dfrac{\gamma'}{i_{ave}\,\gamma_w} \\ FS_{\text{با فیلتر}}=\dfrac{\gamma'+(\frac{D_1}{D})\gamma'_F}{i_{ave}\,\gamma_w} \end{cases} \Rightarrow \frac{FS_{\text{با فیلتر}}}{FS_{\text{بدون فیلتر}}}=\frac{\dfrac{\gamma'+(\frac{D_1}{D})\gamma'_F}{i_{ave}\,\gamma_w}}{\dfrac{\gamma'}{i_{ave}\,\gamma_w}}=\frac{\gamma'+(\frac{D_1}{D})\gamma'_F}{\gamma'}=\frac{\gamma'+(\frac{\frac{1}{4}D}{D})\times 2\gamma'}{\gamma'}=1/5$$

پس در اثر اجرای فیلتر ضریب اطمینان در مقابل جوشش ۱/۵ برابر می‌شود.

۳۲- (۴)

طبق نظر ترزاقی، ضریب اطمینان در برابر جوشش (در یک شبکهٔ جریان) برابر می‌شود با:

$$FS_{\text{جوشش}}=\frac{i_{cr}}{i_{ave}}$$

الف) محاسبهٔ i_{cr}

$$i_{cr}=\frac{\gamma'}{\gamma_w}=\frac{21-10}{10}=1/1$$

ب) محاسبهٔ i_{ave}

(از a تا سطح خاک ۳ پله افت داریم — از b تا سطح خاک ۱/۵ پله افت داریم)

$$\begin{cases} i_{ave}=\dfrac{\Delta h_{ave}}{L}=\dfrac{\dfrac{\Delta h_a+\Delta h_b}{۲}}{L}=\dfrac{\dfrac{۳\,\Delta h+۱/۵\,\Delta h}{۲}}{L}=\dfrac{۲/۲۵\,\Delta h}{L} \\ \Delta h=\dfrac{\Delta H_{کل}}{N_d}=\dfrac{۴}{۶}=\dfrac{۲}{۳}\ ,\ L=۱/۵\,m \end{cases} \Rightarrow i_{ave}=\dfrac{۲/۲۵\times\dfrac{۲}{۳}}{۱/۵}=۱$$

و در نهایت $FS_{جوشش}$ برابر می‌شود با:

$$FS_{جوشش}=\frac{i_{cr}}{i_{ave}}=\frac{۱/۱}{۱}=۱/۱$$

۳۳- (۳)

می‌دانیم در شبکه‌های جریان فقط پایداری خاک در برابر جوشش بررسی می‌شود. از طرفی چون در این مسئله بحث حضور سربار مطرح شده است، نمی‌توانیم رابطهٔ ساده شدهٔ $FS=\frac{i_{cr}}{i}$ را به‌کار ببریم. پس از رابطهٔ اصلی ضریب اطمینان در مقابل جوشش استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\begin{cases} FS_{جوشش}=\dfrac{\text{نیروی مقاوم}}{\text{نیروهای مخرب}}=\dfrac{\sigma'^{*}+P'_{سربار}}{P_{فشار\ تراوش}} \\ \sigma'^{*}=\gamma' H=(۱۸-۱۰)\times ۲=۱۶\ kN/m^۲ \\ P_{فشار\ تراوش}=iz\gamma_w=(\dfrac{\Delta H}{L})z\gamma_w\quad,\quad \Delta H=۲\,\Delta h=۲\times\dfrac{\Delta H_{کل}}{N_d}=۲\times\dfrac{۱۲}{۱۲}=۲m\ \Rightarrow\ P_{فشار\ تراوش}=\dfrac{۲}{۲}\times ۲\times ۱۰=۲۰\ kN/m^۲ \end{cases}$$

(از A تا سطح خاک دو پله افت داریم)

$$\Rightarrow FS_{جوشش}=\frac{\sigma'^{*}+P'_{سربار}}{P_{فشار\ تراوش}}=\frac{۱۶+P'_{سربار}}{۲۰}=۲\ \Rightarrow\ P'_{سربار}=۲۴\ kN/m^۲$$

البته مقدار به‌دست آمده برای سربار به‌صورت مؤثر بوده و چون $۱m$ آب در پایین‌دست داریم، سربار کل برابر می‌شود با:

$$P_{سربار}=P'_{سربار}+\gamma_w\ h_w=۲۴+۱۰\times ۱=۳۴\ kN/m^۲$$

۳۴- (۳)

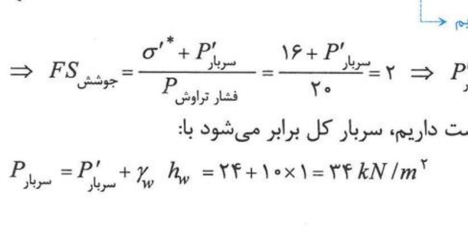
چون ابعاد آخرین چشمه در شبکه جریان داده شده است، بنابراین برای محاسبهٔ $FS_{جوشش}$ از روش دوم (روش شبکهٔ جریان) استفاده می‌کنیم.

$$\begin{cases} FS_{جوشش}=\dfrac{i_{cr}}{(i_{max})_{exit}} \\ i_{cr}=\dfrac{\gamma'}{\gamma_w}=\dfrac{۲۰-۱۰}{۱۰}=۱ \\ (i_{max})_{exit}=\dfrac{\Delta h}{L}=\dfrac{(\dfrac{\Delta H_{کل}}{N_d})}{L}=\dfrac{(\dfrac{۷/۵-۱/۵}{۶})}{۲}=۰/۵ \end{cases} \Rightarrow FS_{جوشش}=\frac{۱}{۰/۵}=۲>۱$$

پس احتمال زیرشویی یا همان جوشش وجود ندارد.

۳۵- (۱)

ابتدا تعداد افت‌های پتانسیل (تعداد پله‌های افت) را می‌شماریم که $N_d=۱۸$ می‌باشد. سپس جهت محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ x به‌ترتیب زیر عمل می‌کنیم.



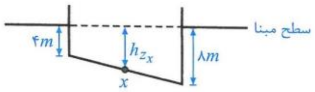
- با توجه به تراز مبنای مشخص شده در شکل، H_x را به‌دست می‌آوریم.

$$\begin{cases} H_x=H_B-\Delta H_{xB} \\ H_B=\text{فاصلهٔ تراز پیزومتری } B \text{ از تراز مبنا}=۶\ m \\ \Delta H_{xB}=۷\,\Delta h=۷\times\dfrac{\Delta H_{کل}}{N_d}=۷\times\dfrac{۶}{۱۸}=۲/۳۳\ m \end{cases}$$

(از B تا x، ۷ پله افت رخ داده است.)

$$\Rightarrow H_x=۶-۲/۳۳=۳/۶۷\ m$$

● h_{z_x} نیز با توجه به هندسهٔ شکل (و اینکه x درست در وسط سازه است) برابر می‌شود با:



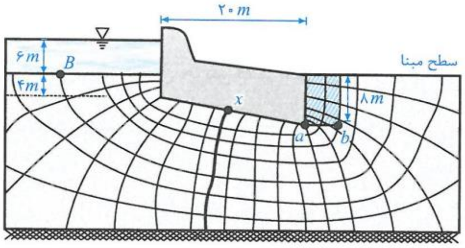
$$h_{z_x} = -(\frac{۴+۸}{۲}) = -۶\ m$$

● در نتیجه h_{p_x} و از آنجا u_x برابر می‌شوند با:

$$H_x = h_{z_x} + h_{p_x} \Rightarrow ۳/۶۷ = -۶ + h_{p_x} \Rightarrow h_{p_x} = ۹/۶۷\ m$$

$$u_x = h_{p_x}\gamma_w = ۹/۶۷ \times ۱۰ = ۹۶/۷\ kN/m^۲$$

در ادامه طبق نظر ترزاقی، ضریب اطمینان در مقابل جوشش به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.



$$FS_{جوشش} = \frac{i_{cr}}{i_{ave}}$$

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{۲۰-۱۰}{۱۰} = ۱$$

$$i_{ave} = \frac{\Delta h_{ave}}{L} = \frac{(\frac{\Delta h_a + \Delta h_b}{۲})}{L} = \frac{(\frac{۶\ \Delta h + ۴\ \Delta h}{۲})}{۸}$$

$$= \frac{۵}{۸}\Delta h = \frac{۵}{۸} \times \frac{۶}{۱۸} \simeq ۰/۲۱$$

(از a تا سطح مبنا، ۶ پله افت داریم — از b تا سطح مبنا، ۴ پله افت داریم — $\Delta h = \frac{\Delta H_{کل}}{N_d}$)

$$\Rightarrow FS_{جوشش} = \frac{i_{cr}}{i_{ave}} = \frac{۱}{۰/۲۱} \simeq ۴/۸$$

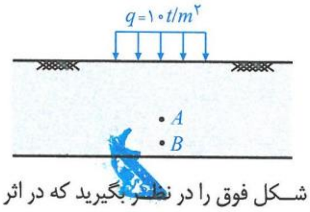
توجه: همانطورکه در متن درس گفته شد (تذکر ۱ بعد از روش ترزاقی)، در برخی مواقع به‌جای استفاده از Δh_{ave} از $\Delta h_{بیشتر}$ استفاده می‌شود که شرایط محافظه کارانه‌ای را ایجاد می‌کند. در این تست نیز اگر همین کار را انجام دهیم، خواهیم داشت:

$$i_{بیشتر} = \frac{\Delta h_{بیشتر}}{L} = \frac{\Delta h_a}{L} = \frac{۶\Delta h}{L} = \frac{۶\times\frac{۶}{۱۸}}{۸} = \frac{۱}{۴}$$

$$\Rightarrow FS_{جوشش} = \frac{i_{cr}}{i_{بیشتر}} = \frac{۱}{(\frac{۱}{۴})} = ۴$$ (گویا منظور طراح همین بوده است)

فصل ۶: توزیع تنش در خاک

مروری بر آنچه خواهیم خواند:



در فصل قبل با نحوهٔ محاسبهٔ تنش مؤثر و تنش کل در خاک آشنا شدیم و دیدیم که این تنش‌ها ناشی از وزن خاک هستند. در ادامهٔ مباحث درس مکانیک خاک، در این فصل می‌خواهیم موضوع مهم دیگری را در مورد تنش در خاک‌ها بررسی کنیم. برای این منظور شکل فوق را در نظر بگیرید که در اثر ساخت یک سازه، تنش $q = 10\ ton/m^2$ در مساحت محدودی بر سطح خاک وارد شده است. حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که در اثر اعمال این بار، تنش قائم در نقاط A و B چقدر زیاد می‌شود که در جواب باید گفت، اضافه تنش قائم در نقاط A و B که آن را با $\Delta\sigma_z$ نشان می‌دهیم، کمتر از $10\ ton/m^2$ بوده و به‌صورت ضریبی از q بیان می‌شود. در مکانیک خاک این ضریب را با I نشان داده و به آن ضریب تأثیر تنش (ضریب کاهش تنش) می‌گوییم:

تغییر تنش کل در A: $\Delta\sigma_{z_A} = q\ I_A$ (ضریب تأثیر تنش در A)، تغییر تنش کل در B: $\Delta\sigma_{z_B} = q\ I_B$ (ضریب تأثیر تنش در B)

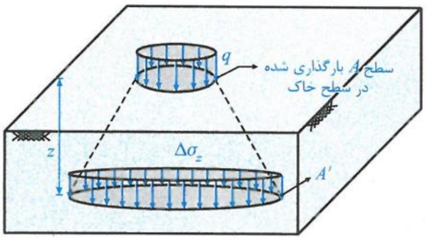
از سوی دیگر قابل پیش‌بینی است که هر چه از محل بارگذاری دورتر شویم، تأثیر بار q کم شده و ضریب I نیز کوچکتر می‌شود (یعنی $I_B < I_A$). ما در این فصل می‌خواهیم روش‌های محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ در اثر بارگذاری‌های مختلف بر روی سطح خاک را یاد بگیریم. برای درک بهتر شما دانشجویان عزیز، مطالب این فصل را (که به نوعی روش‌های مختلف محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ در نقاط مختلف خاک است) به‌صورت نمودار درختی زیر ارائه می‌کنیم:

توزیع تنش در خاک:
- قسمت اول: روش تقریبی ۲ به ۱
- قسمت دوم: روش بوسینسک و روش وسترگارد
- قسمت سوم: روش منحنی نیومارک

A-۱- مفهوم اصلی روش تقریبی ۲ به ۱

وقتی روی سطح خاک باری وارد می‌شود، استفاده از **روش تقریبی ۲ به ۱**، ساده‌ترین کار برای محاسبهٔ اضافه تنش ایجاد شده در عمق خاک است.

برای شروع فرض کنید که بار گستردهٔ q در ناحیه‌ای به مساحت A بر سطح خاک وارد می‌شود و هدف ما این است که ببینیم **اضافه تنش قائم** ایجاد شده در عمق z از این خاک (یعنی $\Delta\sigma_z$) چقدر است؟



برای پاسخ به این سؤال، دو فرض زیر را در نظر می‌گیریم:

۱) در عمق z، بارگذاری اعمال شده در سطح خاک، به‌جای مساحت A در مساحت بزرگتری به اندازهٔ A' اثر کرده و در نتیجه اضافه تنش $\Delta\sigma_z$ را در این ناحیه، در عمق z ایجاد می‌کند.

۲) کل بارگذاری در عمق z با کل بارگذاری در سطح خاک برابر است.

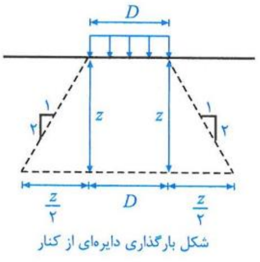
حال بر مبنای این دو فرض می‌توان نوشت:

کل بارگذاری در عمق z = کل بارگذاری در سطح خاک

$$q \times A = \Delta\sigma_z \times A' \Rightarrow \boxed{\Delta\sigma_z = q\left(\frac{A}{A'}\right)}$$

در رابطه‌ای که به‌دست آوردیم، نسبت $\frac{A}{A'}$ در واقع همان ضریب تأثیری است که در مقدمهٔ فصل آن را به شما معرفی کردیم. حال سؤال اساسی آن است که مساحت A' در این رابطه چگونه به‌دست می‌آید؟

در جواب باید بگوییم که در روش تقریبی دو به یک (قائم ۲ به افقی ۱)، برای یافتن مساحت A' فرض می‌کنیم که ابعاد شکل هندسی ناحیهٔ بارگذاری در سطح خاک (A) با نفوذ به اندازهٔ z در عمق خاک، در هر طرف به اندازهٔ $\frac{z}{۲}$ (یعنی نصف نفوذ قائم) بزرگ می‌شود. این موضوع یعنی اگر به‌طور مثال بارگذاری در دایره‌ای به قطر D بر سطح خاک وارد شود، در عمق z این بارگذاری در دایره‌ای به قطر $D + ۲(\frac{z}{۲}) = D + z$ تحمل می‌شود:



شکل بارگذاری دایره‌ای از کنار

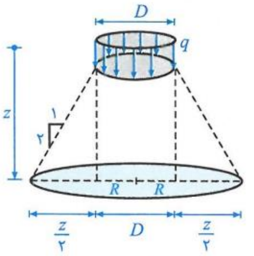
$$D \text{ قطر} \xrightarrow{\text{تبدیل می‌شود به}} D + \frac{z}{۲} + \frac{z}{۲} = D + z$$

قسمت اول (روش تقریبی ۲ به ۱)

زیر شاخه‌های قسمت اول

A-۱- مفهوم اصلی روش تقریبی ۲ به ۱
A-۲- آشنایی با روابط روش تقریبی ۲ به ۱

بنابراین با محاسبهٔ مساحت A و A'، مقدار اضافه تنش $\Delta\sigma_z$ در عمق z عبارت است از:



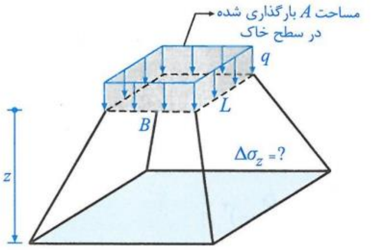
شکل بارگذاری دایره‌ای

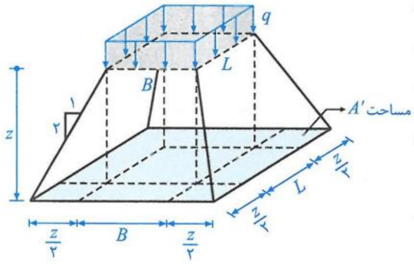
$$\begin{cases} A = \dfrac{\pi D^{۲}}{۴} \\ A' = \dfrac{\pi (D+z)^{۲}}{۴} \end{cases}$$

$$\Delta\sigma_z = q\left(\frac{A}{A'}\right) \Rightarrow \boxed{\Delta\sigma_z = q\left(\frac{D}{D+z}\right)^{۲}}$$

در ادامه با حل یک تمرین، نحوهٔ تشخیص A' و محاسبهٔ آن و در نهایت چگونگی تعیین $\Delta\sigma_z$ در عمق z از خاک را بهتر درک می‌کنیم.

تمرین ۱: در شکل مقابل، یک بارگذاری با شدت q در ناحیه‌ای مستطیلی با ابعاد B و L، به سطح خاک وارد می‌شود. با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱، اضافه تنش ایجاد شده ناشی از این بارگذاری در عمق z را محاسبه کنید.





● پاسخ: فرض کنید که مساحت $A = B \times L$ در سطح خاک، در عمق z بزرگ شده و به A' رسیده است. برای محاسبهٔ A' با توجه به شکل ملاحظه می‌کنید که A' در عمق z به این صورت به‌دست آمده است که هر یک از ابعاد ناحیهٔ بارگذاری A در سطح خاک، به اندازه $\frac{z}{۲}$ از هر طرف گسترش یافته و بزرگتر شده‌اند، پس A' یک سطح مستطیلی با ابعاد $L' = L + ۲\times\frac{z}{۲} = L + z$ و $B' = B + ۲\times\frac{z}{۲} = B + z$ خواهد بود. حال در ادامه و پس از مشخص شدن A'، مقدار $\Delta\sigma_z$ را به‌صورت زیر می‌یابیم:

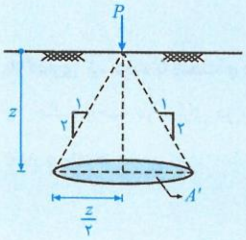
کل بارگذاری در سطح خاک = کل بارگذاری در عمق z $\Rightarrow q \times \underbrace{A}_{B\times L} = \Delta\sigma \times \overbrace{A'}^{(B+z)(L+z)} \Rightarrow \Delta\sigma = q\,\dfrac{BL}{(B+z)(L+z)}$

تذکر مهم: اگر بار وارد بر سطح خاک به‌صورت نقطه‌ای (نیروی P) یا خطی (به‌صورت $\frac{\text{نیرو}}{\text{طول}}$) باشد، در آن‌صورت بارگذاری روی سطح خاک دیگر بر ناحیه‌ای به مساحت A وارد نمی‌شود و عملاً مفهوم ضریب تأثیر در این شرایط بی‌معنی است. در این حالت برای محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ باز هم کل بارگذاری در سطح خاک با کل بارگذاری در عمق z برابر قرار داده می‌شود که روابط آن را به همراه دیگر حالت‌های بارگذاری، در ادامهٔ بحث خواهید دید.

A-۲- آشنایی با روابط روش تقریبی ۲ به ۱

با استفاده از قانون گفته شده در محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ در روش تقریبی ۲ به ۱ می‌توان اضافه تنش $\Delta\sigma_z$ را در انواع مختلف بارگذاری‌ها به‌صورت زیر به‌دست آورد:

۱- بار نقطه‌ای (منفرد یا متمرکز) با اندازهٔ P:

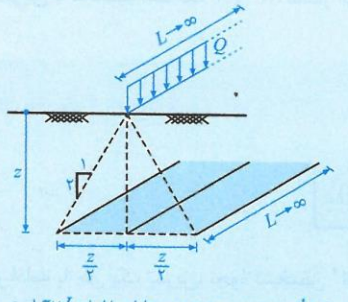


سطح تأثیر تنش در عمق z، دایره‌ای با شعاع $\frac{z}{۲}$ است.

کل بار در سطح خاک = کل بار در عمق z

$$P = \Delta\sigma_z \times \underbrace{\pi \times \left(\frac{z}{۲}\right)^{۲}}_{A'} \Rightarrow \boxed{\Delta\sigma_z = \frac{۴P}{\pi z^{۲}}}$$

۲- بار خطی نامحدود با شدت یکنواخت Q:

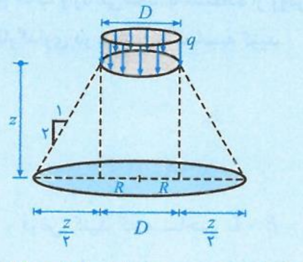


سطح تأثیر تنش در عمق z، مستطیلی با ابعاد $z \times L$ است.

کل بار در عمق z = کل بار در سطح خاک

$$Q \times L = \Delta\sigma_z \times \underbrace{(z \times L)}_{A'} \Rightarrow \boxed{\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z}}$$

۳- بار گستردهٔ دایره‌ای با شدت یکنواخت q:

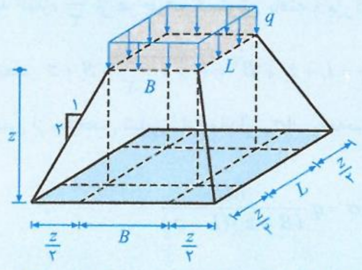


سطح تأثیر تنش در عمق z، دایره‌ای با قطر $D+z$ است.

کل بار در عمق z = کل بار در سطح خاک

$$q \times \frac{\pi D^2}{4} = \Delta\sigma_z \times \frac{\pi \times (D+z)^2}{4} \Rightarrow \boxed{\Delta\sigma_z = q\left(\frac{D}{D+z}\right)^2}$$

۴- بار گستردهٔ مستطیلی با شدت یکنواخت q:



سطح تأثیر تنش در عمق z، مستطیلی به ابعاد $B+z$ و $L+z$ است.

کل بار در عمق z = کل بار در سطح خاک

$$q \times (B \times L) = \Delta\sigma (B+z)(L+z) \Rightarrow \boxed{\Delta\sigma = q\,\frac{BL}{(B+z)(L+z)}}$$

۵- بار نواری با شدت یکنواخت q:

بار نواری در واقع حالت خاصی از بار گستردهٔ مستطیلی است که در آن یکی از ابعاد پی (مثلاً طول L) نامحدود است ($L \to \infty$). در عمل مهندسین ژئوتکنیک برای یک پی با نسبت ابعاد $\frac{L}{B} > 10$، بارگذاری را نواری در نظر می‌گیرند. در این حالت اضافه تنش ایجاد شده در اثر بارگذاری به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{مستطیل}: \Delta\sigma = q\,\frac{BL}{(B+z)(L+z)} \xrightarrow[\text{تقریباً با هم برابر است.}]{\text{اگر } L \to \infty \text{، آنگاه } L \text{ و } L+z} \boxed{\Delta\sigma = q\,\frac{B}{B+z}}$$

۶- بارگذاری گسترده با شدت q در یک سطح بسیار وسیع روی خاک:

در این حالت ناحیه بارگذاری در سطح خاک را می‌توان مانند یک سطح مستطیلی دانست که در آن B و L هر دو به سمت بی‌نهایت میل می‌کنند و داریم:

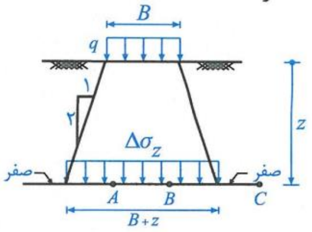
$$\text{بارگذاری مستطیلی}: \Delta\sigma_z = q\,\frac{BL}{(B+z)(L+z)} \xrightarrow[B+z \simeq B \text{ و } L+z \simeq L \text{ است.}]{\text{اگر } L, B \to \infty \text{، آنگاه}} \Delta\sigma_z = q$$

یعنی در این حالت خاص، در تمام اعماق، تنش به اندازهٔ q در خاک افزایش می‌یابد.

همانطورکه مشاهده کردید اگر شکل‌های رسم شده را خوب درک کنیم، عملاً نیازی به حفظ روابط روش تقریبی ۲ به ۱ نیست.

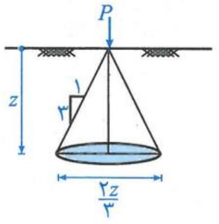
در ادامه به چند تذکر مهم زیر در تکمیل بحث روش تقریبی ۲ به ۱ توجه کنید:

۱) در روش تقریبی ۲ به ۱، چنانچه نقطه‌ای خارج از محدوده توزیع تنش باشد، در آنصورت اضافه تنش قائم در آن نقطه صفر خواهد بود. در عوض اضافه تنش قائم در کلیهٔ نقاطی که در داخل محدوده و در یک ترازند ($z = const$) مقدار یکسانی است. به‌طور مثال در بارگذاری نواری زیر با توجه به روش تقریبی ۲ به ۱، اضافه تنش کل در نقاط A، B و C عبارت است از:



$$\Delta\sigma_{z_A} = \Delta\sigma_{z_B} = q\,\frac{B}{B+z} \quad , \quad \Delta\sigma_C = 0$$

۲) اگر در سؤالات مربوط به توزیع تنش در خاک به‌جای شیب ۲ به ۱، شیب دیگری مثلاً ۳ به ۱ مدنظر باشد، در آنصورت محاسبه اضافه تنش قائم مشابه با روش دو به یک خواهد بود با این تفاوت که مساحت تأثیر تنش در عمق z (یعنی A') تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال برای بار نقطه‌ای P با فرض به‌کارگیری روش ۳ به ۱ داریم:



$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{\frac{\pi}{4}\times\left(\frac{2z}{3}\right)^2} = \frac{9P}{\pi z^2}$$

دقت شود که برخی مراجع روش تقریبی ۲ به ۱ را برای رس (ریزدانه) و روش تقریبی ۱ به ۱ را برای ماسه (درشت‌دانه) مناسب می‌دانند و این موضوع زمانی در حل سؤالات مورد نظر قرار می‌گیرد که به نحوه توزیع تنش در روش تقریبی اشاره نشده باشد.

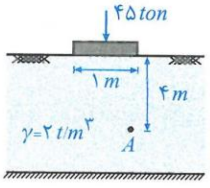
۳) اگر یک بار نقطه‌ای مانند P از طریق یک پی مستطیلی به زمین فشار وارد کند، می‌توان آن را معادل با بار q دانست که در مساحت BL بر سطح خاک اثر می‌کند (این موضوع را می‌توانید به پی‌های دایره‌ای نیز تعمیم دهید).

در این حالت رابطهٔ $\Delta\sigma_z$ در پی مستطیلی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

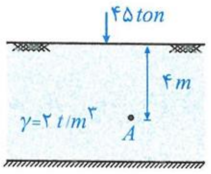
$$\Delta\sigma = q\,\frac{BL}{(B+z)(L+z)} \Rightarrow \Delta\sigma = \frac{P}{(B+z)(L+z)} \qquad \left(q = \frac{P}{BL}\right)$$

در ادامه با حل چند تمرین، روش تقریبی ۲ به ۱ را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۲: یک بار ۴۵ تنی مطابق شکل زیر، یکبار به‌صورت متمرکز و بار دیگر توسط یک شالوده به ابعاد $1m \times 2m$ به زمین منتقل می‌شود. با فرض توزیع دو به یک تنش در خاک (قائم ۲ و افقی ۱)، مقدار اضافه تنش قائم در عمق ۴ متری از سطح زمین را در هریک از دو حالت، برای نقطهٔ A به‌دست آورید. ($\pi = 3$)



حالت(۲)



حالت(۱)

حل: با توجه به روش تقریبی ۲ به ۱، در مقایسهٔ این دو حالت می‌توان نوشت:

حالت ۱ (بار نقطه‌ای):

$$\Delta\sigma_{z_1} = \frac{4P}{\pi z^2} \xrightarrow[z=4m]{P=45ton} \Delta\sigma_{z_1} = \frac{4\times 45}{\pi\times 4^2} = 3/75\, ton/m^2$$

حالت ۲ (بار اعمال شده از طرف پی مستطیلی): بار $P = 45\,ton$ در حالت دوم را که بر پی مستطیلی وارد می‌شود، می‌توان معادل بار گستردهٔ $q = \frac{P}{BL}$ دانست که $\Delta\sigma_z$ در عمق z برای آن عبارت است از:

$$\Delta\sigma_{z_2} = \frac{P}{(B+z)(L+z)} \xrightarrow[B=1m,\,L=2m]{z=4m,\ P=45\,ton} \Delta\sigma_{z_2} = \frac{45}{(1+4)(2+4)} = 1/5\, ton/m^2$$

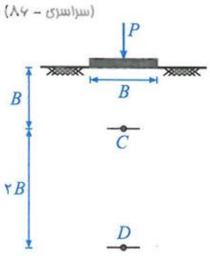
تذکر: اگر مقدار تنش قائم در نقطهٔ A در این دو حالت را از ما بپرسند، در آن‌صورت به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$(\sigma_A)_1 = \sigma_{\circ A} + \Delta\sigma_{z_1} = \gamma z + \Delta\sigma_{z_1} = 2\times 4 + 3/75 = 11/75\, ton/m^2$$

$$(\sigma_A)_2 = \sigma_{\circ A} + \Delta\sigma_{z_2} = \gamma z + \Delta\sigma_{z_2} = 2\times 4 + 1/5 = 9/5\, ton/m^2$$

تمرین ۳: یک پی مستطیلی به ابعاد $B\times 2B$ واقع بر خاک همگن و هموژن با مدول الاستیک E و ضریب پواسون ν تحت بار P قرار دارد. نسبت تنش توزیع شده در نقطه C به نقطه D با روش توزیع تقریبی ۲ : ۱ (قائم: افقی) چه میزان است؟ (از وزن ستون خاک صرفنظر گردد.)

(سراسری - ۸۶)



۱) $\frac{5}{3}$

۲) ۲

۳) $\frac{10}{3}$

۴) $\frac{20}{3}$

حل: با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱ در پی‌های مستطیلی خواهیم داشت:

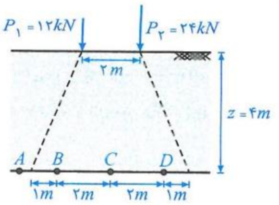
$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)(L+z)} \Rightarrow \frac{\Delta\sigma_{z_C}}{\Delta\sigma_{z_D}} = \frac{\left[\frac{P}{(B+z_C)(L+z_C)}\right]}{\left[\frac{P}{(B+z_D)(L+z_D)}\right]} = \frac{(B+z_D)(L+z_D)}{(B+z_C)(L+z_C)} = \frac{(B+3B)(2B+3B)}{(B+B)(2B+B)}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta\sigma_{z_C}}{\Delta\sigma_{z_D}} = = \frac{4B\times 5B}{2B\times 3B} = \frac{10}{3}$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تذکر: منظور صورت سؤال از عبارت «از وزن خاک صرف‌نظر کنید»، آن است که از تنش γz صرف‌نظر کنید.

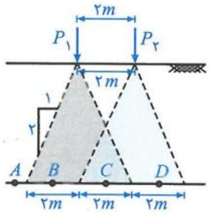
تمرین ۴: دو بار متمرکز که به‌ترتیب برابر $12kN$ و $24kN$ می‌باشند، بر سطح زمین اعمال می‌شوند. با فرض توزیع تنش تقریبی (۲ به ۱)، اضافه تنش ایجاد شده در نقاط A ، B ، C و D را به‌دست آورید. ($\pi = 3$)



حل: ابتدا اضافه تنش ناشی از هر یک از بارها را در عمق $z = 4\,m$ به‌صورت جداگانه به‌دست می‌آوریم:

$$\Delta\sigma_z = \frac{4P}{\pi z^2} \Rightarrow \Delta\sigma_{z(1)} = \frac{4\times 12}{\pi\times 4^2} = \frac{3}{\pi} \simeq 1\, kN/m^2 \quad , \quad \Delta\sigma_{z(2)} = \frac{4\times 24}{\pi\times 4^2} = \frac{6}{\pi} \simeq 2\, kN/m^2$$

حال می‌خواهیم اضافه تنش در هر یک از نقاط A ، B ، C و D را به‌دست آوریم، برای این منظور باید محدودهٔ تأثیر تنش را برای هر یک از بارهای P_1 و P_2 نشان دهیم و ببینیم هر یک از نقاط مذکور، تحت تأثیر کدام بار قرار می‌گیرند:



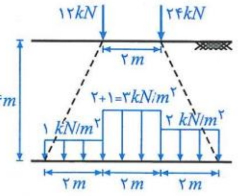
نقطهٔ A خارج از محدودهٔ توزیع تنش P_1 و P_2 $\Rightarrow \Delta\sigma_{z_A} = 0$

نقطهٔ B در محدودهٔ توزیع تنش P_1 و خارج از محدودهٔ توزیع تنش P_2 $\Rightarrow \Delta\sigma_{z_B} = \Delta\sigma_{z_1} = 1\,kN/m^2$

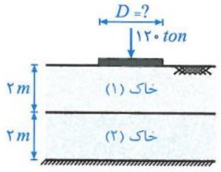
نقطهٔ C در محدودهٔ توزیع تنش P_1 و P_2 $\Rightarrow \Delta\sigma_{z_C} = \Delta\sigma_{z_1} + \Delta\sigma_{z_2} = 1 + 2 = 3\,kN/m^2$

نقطهٔ D در محدودهٔ توزیع تنش P_2 و خارج از محدودهٔ توزیع تنش P_1 $\Rightarrow \Delta\sigma_{z_D} = \Delta\sigma_{z_2} = 2\,kN/m^2$

پس در نهایت، نمودار توزیع تنش در عمق مورد نظر با روش تقریبی ۲ به ۱ به‌صورت زیر خواهد بود:



تمرین ۵: باتوجه به ظرفیت باربری مجاز خاک‌های (۱) و (۲) که به‌ترتیب برابر ۱ و ۰/۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد، حداقل قطر لازم برای یک پی دایره‌ای را جهت انتقال بار ۱۲۰ تنی به خاک تعیین کنید. برای محاسبه اضافه تنش از روش تقریبی ۲ به ۱ استفاده کنید و از وزن خاک نیز صرف‌نظر نمایید. $(\sqrt{10} = 3/15 \,,\, \pi = 3)$



۱) $4\,m$

۲) $4/3\,m$

۳) $4/5\,m$

۴) $4/8\,m$

● در یک پی دایره‌ای با مساحت $A = \frac{\pi D^2}{4}$ ، $\Delta\sigma_z$ در عمق z برابر است با:

$$\Delta\sigma_z = q\left(\frac{D}{D+z}\right)^2 = \frac{P}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \times \left(\frac{D}{D+z}\right)^2 \Rightarrow \Delta\sigma_z = \frac{4P}{\pi(D+z)^2}$$

در ادامه به بررسی هر دو خاک می‌پردازیم:

خاک ۱: در این خاک، بیشترین تنش وارد بر خاک در سطح آن بوده $(z=0)$ و اگر بخواهیم خاک (۱) به مشکل برنخورد، باید داشته باشیم:

$$(\Delta\sigma_{z_{max}})_1 \xlongequal{z=0} \frac{4P}{\pi D^2} \le q_{all_1} \Rightarrow \frac{4\times 120}{3\times D^2} \le \boxed{1\times 10} \Rightarrow D_1 \ge 4\,m$$

تنش مجاز خاک (۱) برحسب ton/m^2

خاک ۲: در این خاک بیشترین تنش وارد بر خاک در مرز خاک (۲) با خاک (۱) بوده $(z = 2\,m)$ و اگر بخواهیم خاک (۲) به مشکل برنخورد، باید داشته باشیم:

$$(\Delta\sigma_{z_{max}})_2 \xlongequal{z=2m} \frac{4P}{\pi(D+2)^2} \le q_{all_2} \Rightarrow \frac{4\times 120}{3\times(D+2)^2} \le \boxed{0/4\times 10} \Rightarrow D_2 \ge (2\sqrt{10}-2) \simeq 4/3\,m$$

تنش مجاز خاک (۲) برحسب ton/m^2

بنابراین حداقل قطر پی دایره‌ای برابر است با:

$$D_{min} = max\{D_1, D_2\} = max\{4, 4/3\} = 4/3\,m$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

قسمت دوم (روش بوسینسک و وسترگارد)

در قسمت اول با روش نسبتاً سادهٔ دو به یک (۲ به ۱) آشنا شدیم، اما مشکل آن است که این روش بسیار تقریبی بوده و برای تخمین‌های دقیق‌تر از مقدار $\Delta\sigma_z$ در خاک، احتیاج به روش‌های دقیق‌تری داریم.

بوسینسک و وسترگارد، دو محققی بودند که روش‌های خود را برای تعیین دقیق‌تر مقدار $\Delta\sigma_z$ در خاک ارائه کردند. در این قسمت از فصل ابتدا **روش بوسینسک** را به‌طور کامل بررسی کرده و در آخر آن را با **روش وسترگارد** مقایسه می‌کنیم. دقت شود که روش وسترگارد به‌دلیل پیچیدگی روابط و کاربرد کم آن در ژئوتکنیک، از اهمیت چندانی برخوردار نیست و به همین دلیل ما نیز از پرداختن به آن صرف‌نظر کرده و صرفاً آن را با روش بوسینسک مقایسه می‌کنیم.

B-۱- فرضیات روش بوسینسک

روش بوسینسک، اغلب در خاک‌های همگن و همسان (به‌خصوص ماسه‌ای) کاربرد دارد.

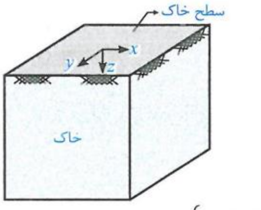
بوسینسک در سال ۱۸۸۵ فرضیات زیر را برای محاسبهٔ اضافه تنش در تودهٔ خاک درنظر گرفت:

۱) خاک بدون وزن است و تغییرحجم آن ناچیز می‌باشد.

۲) محیط خاک، همگن، همسان و نیمه‌بی‌نهایت است.

۳) رفتار خاک الاستیک خطی بوده و از قانون هوک تبعیت می‌کند.

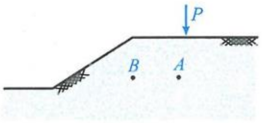
تذکر: محیط نیمه‌بی‌نهایت به توده‌ای گفته می‌شود که تنها یک مرز محدود کننده داشته و از اطراف نامحدود است. درمورد خاک، این مرز محدود کننده در واقع همان، سطح افقی خاک است. شکل زیر این موضوع را بهتر نشان می‌دهد:



محیط نیمه بی‌نهایت $\left\{\begin{array}{ll} -\infty < x < +\infty & \text{(}x\text{ محدود نشده است)} \\ -\infty < y < +\infty & \text{(}y\text{ محدود نشده است)} \\ 0 \le z < \infty & \text{(}z\text{ از یک طرف محدود شده است)} \end{array}\right.$

برای درک بهتر مفهوم محیط نیمه بی‌نهایت، به تمرین زیر توجه کنید.

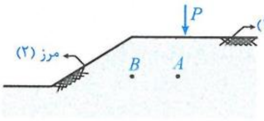
تمرین ۶: فرض کنید که در شکل زیر در هر دو نقطه A و B برای محاسبه اضافه تنش ناشی از نیروی P، از روش بوسینسک استفاده کرده‌ایم:



الف) آیا استفاده از این روش در محیط نشان داده شده مجاز است؟

ب) نتایج به‌دست آمده از روش بوسینسک، در کدام‌یک از نقاط A و B خطای کمتری دارد؟

پاسخ



الف) با توجه به اینکه محیط نشان داده شده دارای دو مرز محدود کننده می‌باشد، این محیط نیمه بی‌نهایت محسوب نمی‌شود و روش بوسینسک در آن اعتبار ندارد.

ب) روش بوسینسک در B خطای بیشتری نسبت به A دارد، زیرا این نقطه به مرز اضافی سمت چپ نزدیک‌تر می‌باشد و شاید بتوان گفت، در این نقطه شرایط محیط نیمه بی‌نهایت بیشتر زیر سؤال رفته است.

زیر شاخه‌های قسمت دوم

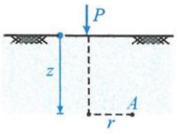
B-۱- فرضیات روش بوسینسک
B-۲- بارگذاری متمرکز در روش بوسینسک
B-۳- بارگذاری گستردهٔ خطی به طول نامحدود در روش بوسینسک
B-۴- بارگذاری گستردهٔ نواری به طول نامحدود در روش بوسینسک
B-۵- بار پی دایره‌ای در روش بوسینسک
B-۶- بار پی مستطیلی در روش بوسینسک
B-۷- مقایسهٔ روش بوسینسک و وسترگارد

جالب است بدانید، رابطه‌ای که بوسینسک (برمبنای فرضیات خود) جهت تعیین اضافه تنش در خاک‌ها ارائه کرد، تنها مربوط به حالتی است که یک بار متمرکز بر سطح خاک وارد می‌شود. اگرچه محاسبه اضافه تنش در حالتهای دیگر بارگذاری توسط بوسینسک انجام نشد ولی بر مبنای محاسباتِ روش او بوده است. به همین علت در مراجع، روابط مربوط به دیگر حالتهای بارگذاری نیز معمولاً به نام روش بوسینسک، معرفی و بررسی می‌شوند.

۱- بار متمرکز ۲- بار گستردهٔ خطی ۳- بار گستردهٔ نواری ۴- بار پی دایره‌ای ۵- بار پی مستطیلی

B-۲- بارگذاری متمرکز در روش بوسینسک

در شکل زیر یک بار نقطه‌ای (مثلاً بار قائم یک دکل برق) به سطح خاک وارد شده است. بوسینسک ثابت می‌کند که اضافه تنش قائم ناشی از بار P در نقطه‌ای مانند A، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:



$$\Delta\sigma_A = \frac{۳P}{۲\pi z^۲}\left[\frac{۱}{۱+(\frac{r}{z})^۲}\right]^{۲/۵}$$

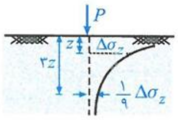
نکات بارگذاری متمرکز

۱ در راستای محور بارگذاری ($r=۰$)، رابطه به شکل زیر ساده می‌شود:

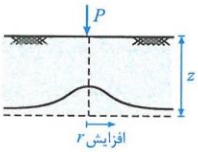
$$r=۰ \Rightarrow \Delta\sigma = \frac{۳P}{۲\pi z^۲}$$

با توجه به رابطهٔ فوق، می‌توان گفت در راستای محور بار متمرکز، اضافه تنش با $z^۲$ رابطهٔ معکوس دارد. به‌طور مثال اگر اضافه تنش ایجاد شده در عمق z از خاک برابر $\Delta\sigma_z$ باشد، در آن‌صورت $\Delta\sigma_z$، در عمق $۳z$ برابر $\frac{۱}{۹}\Delta\sigma_z$ است.

(اگر z در مخرج ۳ برابر شود، مخرج ۹ برابر شده و کسر $\frac{۱}{۹}$ برابر خواهد شد)



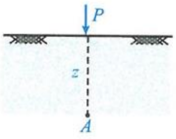
۲ در یک عمق ثابت و با تغییر r، تنش قائم ایجاد شده در خاک به‌صورت زیر تغییر می‌کند:



$$r\uparrow \Rightarrow \left[۱+(\frac{r}{z})^۲\right]\uparrow \Rightarrow \Delta\sigma_z\downarrow$$

با توجه به این نمودار می‌توان فهمید که در یک عمق مشخص، بیشترین اضافه تنش، دقیقاً در زیر بار رخ می‌دهد.

۳ مقدار به‌دست آمده برای $\Delta\sigma_z$ بر روی محور بارگذاری، در روش بوسینسک از روش تقریبی ۲ به ۱ کمتر است، ولی از هر دو روش نتیجه می‌شود که $\Delta\sigma_z$ با $z^۲$ رابطهٔ معکوس دارد:

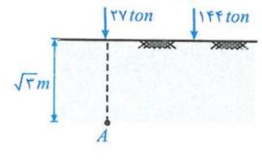


روش بوسینسک: $\Delta\sigma_z = \frac{۳P}{۲\pi z^۲} \Rightarrow \Delta\sigma_z \propto \frac{۱}{z^۲}$

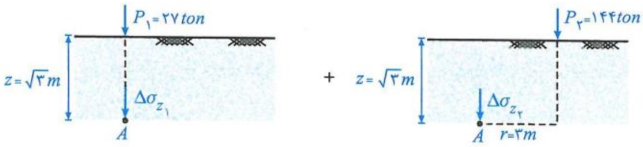
روش تقریبی ۲ به ۱: $\Delta\sigma_z = \frac{۴P}{\pi z^۲} \Rightarrow \Delta\sigma_z \propto \frac{۱}{z^۲}$

در ادامه با حل یک تمرین، بر روی این بحث مسلط‌تر می‌شویم.

تمرین ۷: باتوجه به شکل زیر، اضافه تنش قائم در نقطهٔ A را با استفاده از روش بوسینسک (برحسب $t/m^۲$) محاسبه کنید. ($\pi=۳$)



● حل: بار ۲۷ تنی را با $P_۱$ و بار ۱۴۴ تنی را با $P_۲$ نشان داده و برای محاسبهٔ اضافه تنش قائم در نقطهٔ A از اصل جمع آثار قوا استفاده می‌کنیم:



نقطهٔ A در امتداد محور بار $P_۱$ است، پس اضافه تنش قائم ناشی از این بار برابر می‌شود با:

$$\Delta\sigma_{z_۱}=\frac{۳P_۱}{۲\pi z^۲}=\frac{۳\times۲۷}{۲\pi\left(\sqrt{۳}\right)^۲}=۴/۵\ t/m^۲$$

برای محاسبهٔ اضافه تنش قائم ناشی از بار $P_۲$، چون A در امتداد محور بار نیست، بنابراین از رابطهٔ کلی استفاده می‌کنیم:

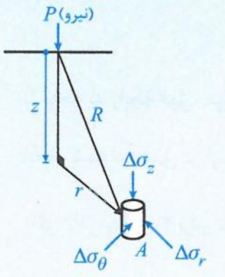
$$\Delta\sigma_{z_۲}=\frac{۳P_۲}{۲\pi z^۲}\left[\frac{۱}{۱+(\frac{r}{z})^۲}\right]^{\frac{۵}{۲}}=\frac{۳\times۱۴۴}{۲\pi(\sqrt{۳})^۲}\left[\frac{۱}{۱+(\frac{۳}{\sqrt{۳}})^۲}\right]^{\frac{۵}{۲}}=۰/۷۵\ t/m^۲$$

در نهایت با کمک اصل جمع آثار می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_{z_A}=\Delta\sigma_{z_۱}+\Delta\sigma_{z_۲}=۴/۵+۰/۷۵=۵/۲۵\ t/m^۲$$

کمی توجه

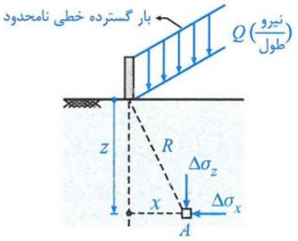
بوسینسک در حالت بارگذاری نقطه‌ای (متمرکز)، علاوه بر $\Delta\sigma_z$، برای محاسبهٔ اضافه تنش‌های $\Delta\sigma_r$ (تنش شعاعی) و $\Delta\sigma_\theta$ (تنش مماسی) نیز روابطی ارائه کرده است که به دلیل کاربرد کم آنها، از ارائهٔ این روابط صرف‌نظر کرده‌ایم. در ضمن گاهی در کتب مرجع مکانیک خاک، برای محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ رابطه زیر را نیز ارائه می‌کنند:



$$\Delta\sigma_z=\frac{۳P}{۲\pi z^۲}\left[\frac{۱}{۱+(\frac{r}{z})^۲}\right]^{۲/۵}=\frac{۳P}{۲\pi z^۲}\frac{z^۵}{(r^۲+z^۲)^{۲/۵}}\xrightarrow{r^۲+z^۲=R^۲}\Delta\sigma_z=\frac{۳P}{۲\pi}\frac{z^۳}{R^۵}$$

B-۳- بارگذاری گستردهٔ خطی به طول نامحدود در روش بوسینسک

فرض کنید که یک دیوار آجری طویل که نمونه‌ای از یک بار خطی است، بر سطح خاک وارد شده است. مطابق شکل مقابل اضافه تنش قائم ناشی از بار خطی را می‌توان به‌صورت زیر تعیین کرد:



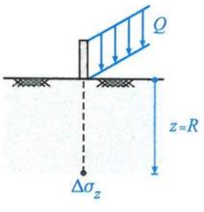
$$\Delta\sigma_z=\frac{۲Qz^۳}{\pi(x^۲+z^۲)^۲}$$

نکات بارگذاری خطی

۱) مشابه با بارگذاری متمرکز، رابطه فوق را می‌توان برحسب وتر مثلث (R)، به‌صورت زیر نیز نوشت $(R^۲=x^۲+z^۲)$:

$$\Delta\sigma_z=\frac{۲Qz^۳}{\pi R^۴}$$

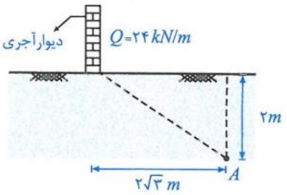
۲) اگر فاصله افقی نقطهٔ موردنظر تا محل اثر بار گستردهٔ خطی صفر باشد $(x=۰)$، در آن‌صورت رابطهٔ محاسبه $\Delta\sigma_z$ در این حالت به‌صورت زیر ساده می‌شود:



$$\Delta\sigma_z=\frac{۲Q}{\pi z}\xrightarrow{\text{نتیجه}}\Delta\sigma_z\propto\frac{۱}{z}$$

۳) نرخ استهلاک تنش در زیر بار، در این حالت از بارگذاری نقطه‌ای کمتر است. در بارگذاری نقطه‌ای $\Delta\sigma_z$ در زیر بار متناسب با $\frac{1}{z^2}$ بوده در حالی‌که در این حالت متناسب با $\frac{1}{z}$ است. در حالت کلی می‌توان نشان داد که استهلاک تنش در حالت بار نقطه‌ای، از هر بارگذاری دیگری شدیدتر است، زیرا محل اثرش کوچکترین محل اثر ممکن است (عملاً یک نقطه).

در ادامه با حل یک تمرین، بر روی این بحث مسلط‌تر می‌شویم.

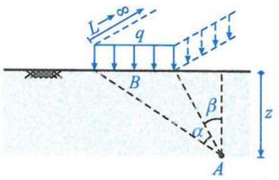


تمرین ۸: یک دیوار آجری با طول زیاد، مطابق شکل برروی سطح خاک اجرا شده است. اضافه تنش قائم ناشی از آن در نقطهٔ A چند kN/m^2 است؟ (از روش بوسینسک استفاده کنید و π را برابر ۳ درنظر بگیرید.)

● حل: با توجه به رابطه‌ای که در این قسمت یاد گرفتیم می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_z=\frac{2Qz^3}{\pi(x^2+z^2)^2}\ ,\ x^2+z^2=(2\sqrt{3})^2+(2)^2=16\,m \Rightarrow \Delta\sigma_z=\frac{2\times 24\times 2^3}{\pi\times(16)^2}=0/5\ kN/m^2$$

B-۴- بارگذاری گستردهٔ نواری به‌طول نامحدود در روش بوسینسک



فرض کنید که یک خاکریز با عرض B و بار گستردهٔ q در طولی نامحدود بر روی سطح خاک اجرا شده است. در این‌صورت برای محاسبهٔ اضافه تنش $\Delta\sigma_z$ در نقطهٔ A، از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم:

$$\Delta\sigma_z=\frac{q}{\pi}[\alpha+\sin\alpha\cos(\alpha+2\beta)]$$

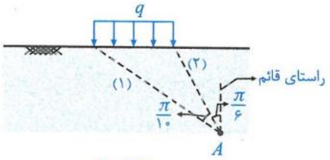
در این رابطه زوایای α و β عبارتند از:

α: زاویه‌ای است که دو خط رسم شده از حاشیهٔ بارگذاری به نقطهٔ A با یکدیگر می‌سازند. این زاویه همواره مثبت است و در رابطهٔ بالا برحسب رادیان به‌کار می‌رود.

β: زاویه‌ای است که امتداد خط قائم با لبهٔ نزدیک‌تر حاشیهٔ بارگذاری می‌سازد. این زاویه در بیرون ناحیهٔ بارگذاری مثبت و برای نقاط زیر بارگذاری منفی است.

برای درک بهتر نحوهٔ محاسبهٔ α و β، به شکل‌های زیر توجه کنید:

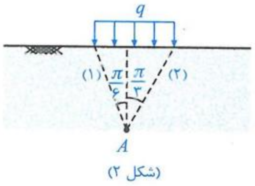
(خطوط ۱ و ۲ به‌ترتیب، از حاشیهٔ سمت چپ و راست بارگذاری به A متصل شده‌اند)



(شکل ۱)

زاویهٔ بین خطچین (۱) و (۲) $=\alpha=+\frac{\pi}{10}$

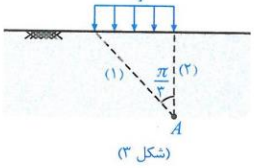
(نقطهٔ A در بیرون بارگذاری است) $+\frac{\pi}{6}=\beta=$ زاویهٔ بین امتداد خط قائم با لبهٔ نزدیکتر حاشیهٔ بارگذاری (لبهٔ ۲)



(شکل ۲)

زاویهٔ بین خطچین‌های (۱) و (۲) $=\alpha=\frac{\pi}{6}+\frac{\pi}{3}=+\frac{\pi}{2}$

(نقطهٔ A در زیر بارگذاری است) $-\frac{\pi}{6}=\beta=$ زاویهٔ بین امتداد خط قائم با لبهٔ نزدیکتر حاشیهٔ بارگذاری (لبهٔ ۱)

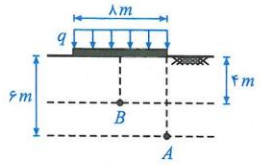


(شکل ۳)

زاویهٔ بین خطچین‌های (۱) و (۲) $=\alpha=+\frac{\pi}{3}$

$0=\beta=$ زاویهٔ بین امتداد خط قائم با لبهٔ نزدیکتر حاشیهٔ بارگذاری (لبهٔ ۲)

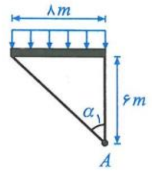
تمرین ۹: یک پی نواری باری به شدت q و عرض $8m$ را مطابق شکل بر سطح زمین وارد می‌کند. نسبت اضافه تنش قائم در عمق ۶ متری در گوشه پی (نقطه A) به اضافه تنش قائم در عمق ۴ متری در وسط پی (نقطه B) کدام است؟ ($\pi \simeq ۳$)



۱) ۰/۵۴۴
۲) ۱/۷۴
۳) ۱/۳۵
۴) ۰/۷۴

پاسخ: برای پاسخ دادن به این تست، گام‌های زیر را طی می‌کنیم:

گام اول: در نقطهٔ A عملاً با یک نقطه در لبهٔ بارگذاری روبرو هستیم و داریم:

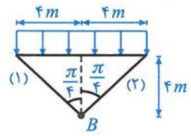


$\beta_۱ = ۰$ (زاویهٔ امتداد قائم با لبهٔ نزدیکتر حاشیهٔ بارگذاری)

$$\sin\alpha_۱ = \frac{۸}{\sqrt{۸^۲+۶^۲}} = ۰/۸ \Rightarrow \alpha_۱ = ۵۳^\circ = ۵۳\times\frac{\pi}{۱۸۰} \simeq \frac{۵۳}{۶۰} = ۰/۸۸\ rad$$

$$(\Delta\sigma_z)_A = \frac{q}{\pi}[\alpha_۱ + \sin\alpha_۱\cos(\alpha_۱ + ۲\times۰)] = \frac{q}{\pi}[۰/۸۸ + \underbrace{\sin ۵۳^\circ}_{۰/۸} \times \underbrace{\cos ۵۳^\circ}_{۰/۶}] = ۱/۳۶\frac{q}{\pi}$$

گام دوم: در نقطهٔ B، زوایای α و β و مقدار $\Delta\sigma_z$ عبارت است از (با توجه به طول‌های افقی و قائم $۴m$، زوایای سمت چپ و راست خط قائم، هر دو برابر ۴۵° یا $\frac{\pi}{۴}$ است)



نقطهٔ B در زیر ناحیهٔ بارگذاری است

$\beta_۲ = -\frac{\pi}{۴}$ (زاویهٔ امتداد قائم با لبهٔ نزدیکتر حاشیهٔ بارگذاری)

$\alpha_۲ = \frac{\pi}{۴} + \frac{\pi}{۴} = \frac{\pi}{۲}$ (زاویهٔ بین خطوط ۱ و ۲)

$$(\Delta\sigma_z)_B = \frac{q}{\pi}[\alpha_۲ + \sin\alpha_۲\cos(\alpha_۲ + ۲\beta_۲)]$$

$$(\Delta\sigma_z)_B = \frac{q}{\pi}[\frac{\pi}{۲} + \sin\frac{\pi}{۲}\cos(\frac{\pi}{۲} + ۲\times(-\frac{\pi}{۴}))] = \frac{q}{\pi}[۱/۵ + ۱] = ۲/۵\frac{q}{\pi}$$

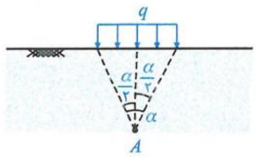
گام سوم: نسبت تنش در A و B را با هم مقایسه می‌کنیم:

$$\frac{(\Delta\sigma_z)_A}{(\Delta\sigma_z)_B} = \frac{۱/۳۶\frac{q}{\pi}}{۲/۵\frac{q}{\pi}} = ۰/۵۴۴$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

نکات بارگذاری نواری

۱) در یک بارگذاری نواری، در یک عمق مشخص حداکثر $\Delta\sigma_z$ در زیر مرکز بارگذاری رخ می‌دهد و مقدار آن برابر است با:

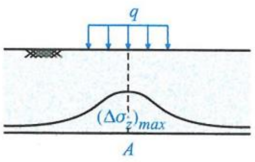


$$\begin{cases} \beta = -\frac{\alpha}{۲} & \text{(نقطهٔ A زیر ناحیهٔ بارگذاری است و } \beta<۰ \text{ است)} \Rightarrow \alpha + ۲\beta = ۰ \\ \alpha = \alpha \end{cases}$$

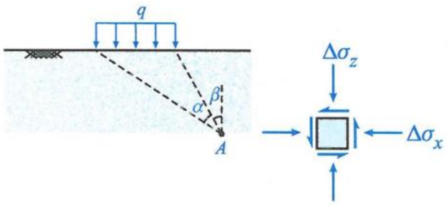
در یک تراز مشخص: $(\Delta\sigma_z)_{max} = \frac{q}{\pi}[\alpha + \sin\alpha \underbrace{\cos(\alpha + ۲\beta)}_{۱}] = \frac{q}{\pi}[\alpha + \sin\alpha]$

($\alpha + ۲\beta$ صفر است.)

۲) نمودار مقابل، تغییرات $\Delta\sigma_z$ را در یک تراز مشخص نشان می‌دهد:



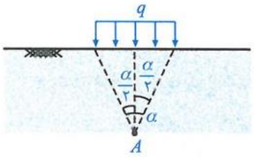
۳ در اثر اعمال یک بارگذاری نواری بر سطح خاک، در نقطه‌ای مانند A علاوه بر اضافه تنش قائم ($\Delta\sigma_z$)، می‌توان $\Delta\sigma_x$، $\Delta\tau_{xz}$ را نیز با کمک روابط زیر محاسبه کرد:



$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi}[\alpha - \sin\alpha\cos(\alpha + ۲\beta)]$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{q}{\pi}[\sin\alpha\sin(\alpha + ۲\beta)]$$

از این دو رابطه می‌توان فهمید که در زیر مرکز بارگذاری، $\Delta\tau_{xz}$ برابر صفر است (درست مانند یک تیر دو سر مفصل که تحت بار گسترده است و برش در وسط آن صفر می‌شود).



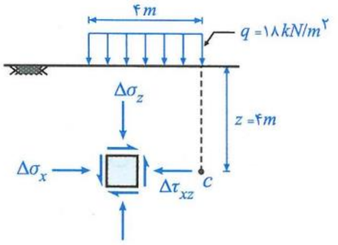
$$\beta = -\frac{\alpha}{۲}$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{q}{\pi}[\sin\alpha \ \sin(\alpha + ۲\beta)\ ] = ۰$$

$\alpha + ۲\beta = ۰$ بوده و سینوس آن نیز صفر است.

در ادامه با حل یک تمرین، مطالب فوق را تکمیل می‌کنیم.

تمرین ۱۰: یک بار نواری با شدت ثابت $۱۸\,kN/m^۲$ و به عرض ۴ متر بر سطح زمین وارد می‌شود. مقادیر تنش‌های قائم، افقی و برشی ناشی از این بار در زیر حاشیه سطح بارگذاری و در عمق ۴ متری از سطح زمین چقدر است؟ (با استفاده از روش بوسینسک مسئله را حل کنید و π را برابر ۳ درنظر بگیرید.)



● حل: مشابه با تمرین‌های قبل، $\beta = ۰$ و $\alpha = \frac{\pi}{۴}$ می‌باشد، بنابراین می‌نویسیم:

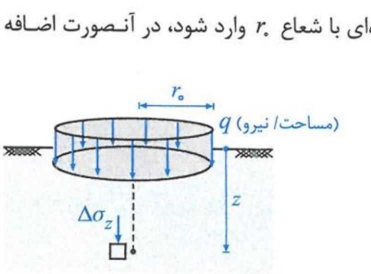
$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi}[\alpha + \sin\alpha\cos(\alpha + ۲\beta)] = \frac{۱۸}{\pi}\left[\frac{\pi}{۴} + \sin\frac{\pi}{۴}\cos\frac{\pi}{۴}\right] = ۷/۵\ kN/m^۲$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi}[\alpha - \sin\alpha\cos(\alpha + ۲\beta)] = \frac{۱۸}{\pi}\left[\frac{\pi}{۴} - \sin\frac{\pi}{۴}\cos\frac{\pi}{۴}\right] = ۱/۵\ kN/m^۲$$

$$\Delta\tau_{xz} = \frac{q}{\pi}[\sin\alpha\sin(\alpha + ۲\beta)] = \frac{۱۸}{\pi}\left[\sin\frac{\pi}{۴}\sin\frac{\pi}{۴}\right] = ۳\ kN/m^۲$$

B-۵- بار پی دایره‌ای در روش بوسینسک

در روش بوسینسک اگر بار گستردهٔ یکنواختی به شدت q، مطابق شکل زیر به یک سطح دایره‌ای با شعاع $r_۰$ وارد شود، در آن‌صورت اضافه تنش قائم ناشی از این بارگذاری در زیر مرکز سطح دایره برابر است با:



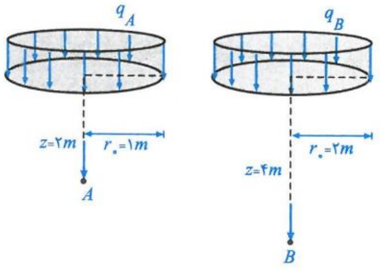
$$\Delta\sigma_z = q\left[1 - \left(\frac{1}{1 + (\frac{r_۰}{z})^۲}\right)^{\frac{۳}{۲}}\right]$$

نکات بارگذاری دایره‌ای

۱) ضریب q در این رابطه، در واقع همان ضریب تأثیر تنش است که در ابتدای فصل با آن آشنا شدیم.

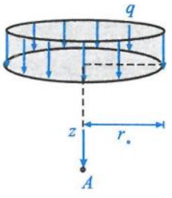
$$\Delta\sigma_z = q\underbrace{\left[1-\left(\frac{۱}{۱+(\frac{r_۰}{z})^۲}\right)^{\frac{۳}{۲}}\right]}_{I} \quad \text{یا} \quad \Delta\sigma_z = qI$$

۲) همانطورکه مشاهده می‌کنید ضریب تأثیر تنش در زیر مرکز سطح پی دایره‌ای، تنها به نسبت $(\frac{r_۰}{z})$ وابسته است. حال اگر نسبت $(\frac{r_۰}{z})$ برای دو پی دایره‌ای متفاوت، یکسان باشد در آن‌صورت ضریب تأثیر تنش آنها (I) نیز یکی خواهد بود. پس با توجه به این موضوع، نسبت $\Delta\sigma_z$ در نقاط A و B از شکل روبرو، برابر نسبت q های آنها می‌باشد، زیرا:

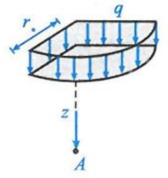


$$(\frac{r_۰}{z})_A = (\frac{r_۰}{z})_B \Rightarrow I_A = I_B \xrightarrow{\Delta\sigma = qI} \boxed{\frac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_B}} = \frac{q_A}{q_B}}$$

۳) اگر به‌جای یک پی دایره‌ای، تنش از طریق یک ربع دایره بر سطح خاک وارد شود، اضافه تنش در نقطهٔ A، $\frac{۱}{۴}$ برابر یک پی دایره‌ای کامل است.



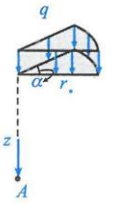
حالت (۱)



حالت (۲)

$$(\Delta\sigma_{z_A})_۲ = \frac{۱}{۴}(\Delta\sigma_{z_A})_۱ = \frac{۱}{۴}qI$$

این موضوع در حالت کلی به یک پی که به‌صورت کمانی از دایره (مثلا α) است نیز قابل تعمیم می‌باشد:



حالت (۱)

$$\Delta\sigma_{z_A} = \frac{\alpha}{۲\pi}\, qI$$

(qI: مربوط به یک پی دایره‌ای کامل)

در ادامه با حل چند تمرین، مطالب را بیشتر بررسی می‌کنیم.

تمرین ۱۱: یک بار نقطه‌ای به اندازه ۵۴ تن، برروی یک پی دایره‌ای به قطر ۶ متر وارد می‌شود. با استفاده از حل بوسینسک، اضافه تنش قائم ایجاد شده در عمق $\sqrt{۳}$ متری زیر مرکز پی را برحسب $t/m^۲$ به‌دست آورید. $(\pi = ۳)$

● حل: با توجه به رابطهٔ بوسینسک می توان نوشت:

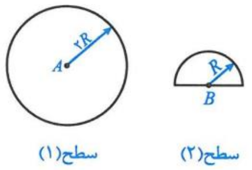
$$q = \frac{P}{A_{\text{پی}}} = \frac{P}{\frac{\pi}{۴}D^۲} = \frac{۵۴}{\frac{\pi}{۴}\times ۶^۲} = ۲\,t/m^۲ \quad \text{: بار گستردهٔ وارد بر سطح خاک}$$

$$\Delta\sigma_z = q\left[1-\left(\frac{۱}{۱+(\frac{r_۰}{z})^۲}\right)^{\frac{۳}{۲}}\right] = ۲\left[1-\left(\frac{۱}{۱+(\frac{۳}{\sqrt{۳}})^۲}\right)^{\frac{۳}{۲}}\right] = ۱/۷۵\,t/m^۲$$

● دقت: روند ساده شدن پرانتز در داخل عبارت فوق، به‌صورت زیر است:

$$(\frac{۳}{\sqrt{۳}})^۲ = (\sqrt{۳})^۲ = ۳ \Rightarrow (\frac{۱}{۱+۳})^{\frac{۳}{۲}} = \left[(\frac{۱}{۴})^{\frac{۱}{۲}}\right]^۳ = (\frac{۱}{۲})^۳ = \frac{۱}{۸}$$

تمرین ۱۴: **شکل زیر دو سطح (۱) و (۲) را نشان می‌دهد که تحت تأثیر بار گسترده‌ای به شدت $10\,kN/m^2$ قرار گرفته‌اند. اگر اضافه تنش قائم در عمق ۶ متری زیر نقطهٔ A برابر $3\,kN/m^2$ باشد، در آن‌صورت اضافه تنش قائم در عمق ۳ متری زیر نقطهٔ B چقدر است؟**



● حل: ابتدا باید دقت شود که سطح (۲) یک نیم‌دایره بوده و $\Delta\sigma_z$ در آن، نصف یک پی دایره‌ای کامل است. در ادامه برای مقایسهٔ $\Delta\sigma_{z_A}$ و $\Delta\sigma_{z_B}$، ابتدا ضریب I را در آنها مقایسه می‌کنیم:

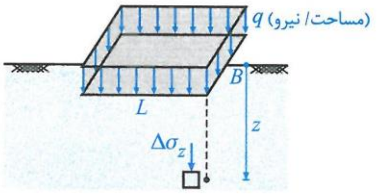
$$\text{سطح (1)}: \left(\frac{r_0}{z}\right)_1 = \frac{2R}{6} = \frac{R}{3} \quad , \quad \text{سطح (2)}: \left(\frac{r_0}{z}\right)_2 = \frac{R}{3} \Rightarrow \left(\frac{r_0}{z}\right)_1 = \left(\frac{r_0}{z}\right)_2 \Rightarrow I_1 = I_2$$

پس در ادامه می‌توان نوشت:

$$\frac{\Delta\sigma_{z_B}}{\Delta\sigma_{z_A}} = \frac{\frac{1}{2}q\,I_2}{q\,I_1} = \frac{1}{2} \xrightarrow{\Delta\sigma_{z_A} = 3\,kN/m^2} \Delta\sigma_{z_B} = \frac{1}{2}\times 3 = 1/5\,kN/m^2$$

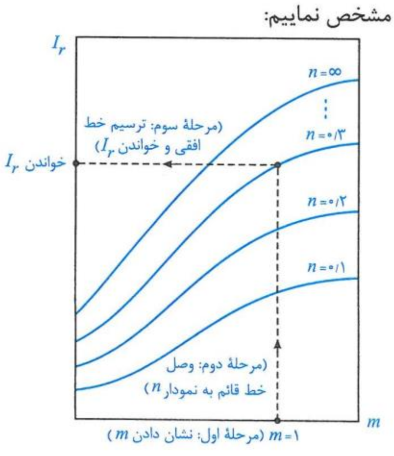
B-۶- بار پی مستطیلی در روش بوسینسک

یک سطح بارگذاری مستطیلی به عرض B و طول L را درنظر بگیرید که بار گستردهٔ یکنواختی با شدت q به آن اعمال می‌شود. دقت کنید که اغلب پی‌های ساختمانی که بارهای وارده را به خاک منتقل می‌کنند، مستطیلی‌اند یا شکل تقریباً مستطیلی دارند. با فرض انعطاف‌پذیر بودن این سطح، اضافه تنش قائم در زیرگوشهٔ آن برابر است با:



$$\Delta\sigma_z = q\,I_r$$

در این رابطه، I_r در واقع همان ضریب تأثیر تنش است که از رابطهٔ نسبتاً پیچیده‌ای به‌دست می‌آید. بد نیست بدانید که در مهندسی عمران معمولاً وقتی با یک رابطهٔ پیچیده روبرو می‌شویم، این رابطه را به نمودار یا گراف‌هایی تبدیل می‌کنیم تا استفاده از آنها راحت‌تر باشد. برای تعیین I_r نیز همین کار انجام شده است و ما می‌توانیم با دانستن مقادیر B، L و z، ابتدا نسبت‌های $n = \frac{B}{z}$ و $m = \frac{L}{z}$ را بیابیم و سپس به گراف‌های شکل زیر مراجعه کرده و به‌صورت زیر، ضریب تأثیر پی را طی ۳ مرحله مشخص نماییم:



مرحلهٔ اول: m را روی محور افقی مشخص می‌کنیم.

مرحلهٔ دوم: از محل m، عمودی به منحنی n (منحنی‌های آبی رنگ) وصل می‌کنیم.

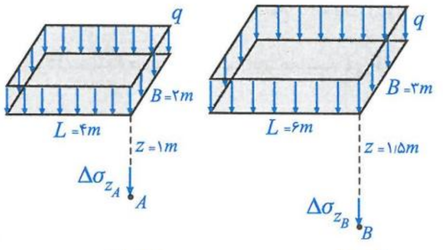
مرحلهٔ سوم: از محل n به‌صورت افقی حرکت کرده و به‌محور قائم I_r می‌رسیم و به این ترتیب مقدار I_r را به‌دست می‌آوریم.

در شکل مقابل نحوهٔ یافتن I_r با فرض $m = 1$ و $n = 0/3$ نشان داده شده است. به‌عنوان یک موضوع مهم توجه کنید که تفاوتی نمی‌کند که جای m و n را برعکس در نظر بگیرید، یعنی با فرض $m = 0/3$ و $n = 1$ نیز به همان I_r می‌رسید که در حالت $m = 1$ و $n = 0/3$ رسیدید.

نکات بارگذاری مستطیلی

۱) گاهی اوقات در صورت سؤال، به‌ازای مقادیر مختلف m و n، مقدار I_r داده می‌شود. در این‌صورت دیگر نیازی به گراف‌های صفحهٔ قبل نبوده و با توجه به مقادیر B و L برای سطح بارگذاری داده شده و عمق نقطهٔ موردنظر، I_r لازم را تعیین می‌کنیم.

۲) به‌طور کلی ضریب تأثیر I_r، به دو نسبت $m=\frac{L}{z}$ و $n=\frac{B}{z}$ بستگی داشته و اگر این دو نسبت در دو پی یکسان باشند، ضریب تأثیر I_r در آنها یکسان خواهد بود (در بسیاری از مسائل نیازی به محاسبهٔ I نیست و با توجه به این نکته عملاً I ها با هم مساوی‌اند). به‌طور مثال در شکل زیر (که شدت بارگذاری‌ها در سطح خاک نیز با هم برابر است) $\Delta\sigma_z$ در دو نقطهٔ A و B یکسان است:



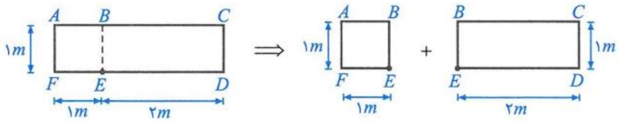
شکل (۱) شکل (۲)

$$\begin{cases}(\frac{B}{z})_۱=(\frac{B}{z})_۲=\frac{۲}{۱}=\frac{۳}{۱/۵}=۲\\ (\frac{L}{z})_۱=(\frac{L}{z})_۲=\frac{۴}{۱}=\frac{۶}{۱/۵}=۴\end{cases} \Rightarrow (I_r)_۱=(I_r)_۲ \Rightarrow \Delta\sigma_{z_A}=\Delta\sigma_{z_B}$$

۳) استفاده از گراف فوق در رابطهٔ $\Delta\sigma_z=q\,I_r$، فقط برای محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ در زیر **گوشهٔ پی** مستطیلی قابل استفاده است.

حال اگر بخواهیم $\Delta\sigma_z$ را در یک نقطه غیر از گوشه مستطیل (مثلاً در مرکز آن) محاسبه کنیم، باید مستطیل اصلی را به تعدادی مستطیل، طوری تجزیه کنیم که نقطهٔ موردنظر در گوشهٔ همه مستطیل‌ها قرار داشته باشد. سپس I_r را برای تک‌تک مستطیل‌ها به‌دست آورده و با اصل جمع آثار، $\Delta\sigma_z$ محاسبه شود.

به‌طور مثال در شکل زیر برای محاسبهٔ اضافه تنش در زیر نقطهٔ E از پی، به‌صورت زیر عمل می‌کنیم (دقت شود که در هر دو شکل جدید، نقطهٔ E در گوشهٔ مستطیل قرار دارد):

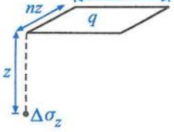


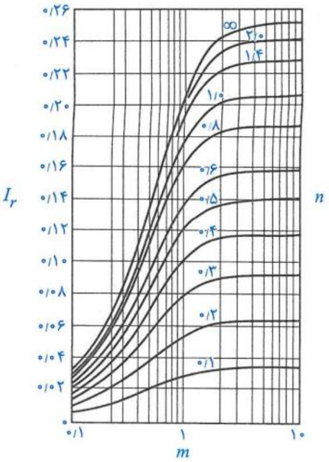
$$(\Delta\sigma_z)_E=(ABEF \text{ در مستطیل } \Delta\sigma_{z_E})+(BEDC \text{ در مستطیل } \Delta\sigma_{z_E})$$

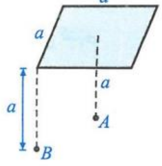
$$(\Delta\sigma_z)_E=q\times I_{ABEF}+q\times I_{BEDC}=q\,(I_{ABEF}+I_{BEDC})$$

در ادامه با حل چند تمرین، بر روی این بحث مسلط‌تر می‌شویم.

تمرین ۱۳: اضافه تنش قائم در عمقی برابر بعد پی مربعی $(z=a)$ در زیر مرکز پی، چند برابر اضافه تنش قائم در همان عمق ولی در زیر یکی از گوشه‌های همان پی است؟
(سراسری - ۹۲)



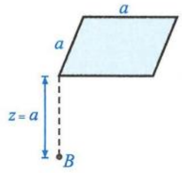




۱) ۱/۸
۲) ۲/۴
۳) ۴
۴) ۳/۲

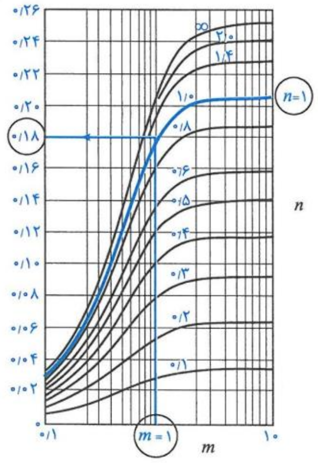
● حل: برای مقایسهٔ تنش در A و B، ابتدا تنش در آنها را محاسبه می‌کنیم:

محاسبهٔ تنش در B: این نقطه در لبهٔ پی قرار گرفته و به‌سادگی ضریب I_r و $\Delta\sigma_z$ برای آن محاسبه می‌شود:



$$\begin{cases} L = a \\ B = a \end{cases} \Rightarrow m = n = \frac{L}{z} = \frac{a}{a} = ۱$$

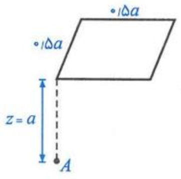
خواندن I_r از روی نمودار :



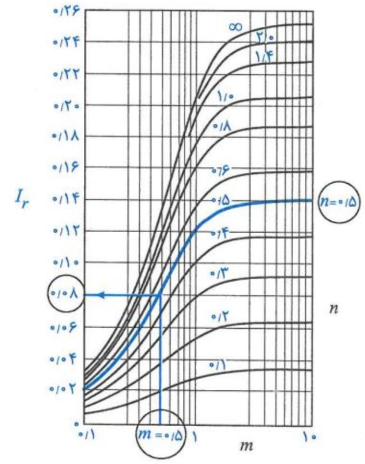
$$\Rightarrow \Delta\sigma_{z_B} = q\,I_r = ۰/۱۸q$$

محاسبهٔ تنش در A: این نقطه در وسط پی قرار گرفته و برای محاسبهٔ اضافه نش در آن، پی را به ۴ قسمت تقسیم کرده و داریم:

$\Delta\sigma_z = ۴\times$



$$\begin{cases} L = ۰/۵a \\ B = ۰/۵a \end{cases} \Rightarrow m = n = \frac{۰/۵a}{a} = ۰/۵$$



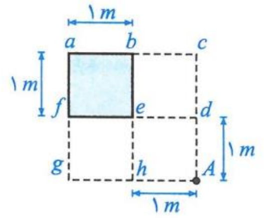
$$\Rightarrow \Delta\sigma_{z_A} = ۴\times q\,I_r = ۴\times ۰/۰۸q = ۰/۳۲q$$

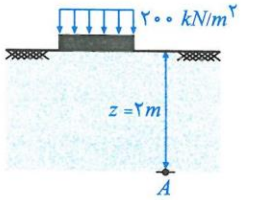
و در مقایسهٔ اضافه تنش در نقاط A و B داریم:

$$\frac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_B}} = \frac{۰/۳۲q}{۰/۱۸q} = ۱/۷۸$$

بنابراین با توجه به گزینه‌ها، گزینهٔ (۱) را انتخاب می‌کنیم.

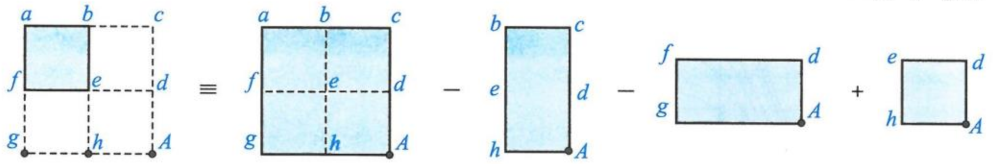
تمرین ۱۴: مطابق شکل بار گسترده‌ای با شدت یکنواخت $۲۰۰\,kN/m^۲$، برروی یک پی مربعی وارد می‌شود. باتوجه به ابعاد پی و نیز جدول ارائـه شده برای ضریب تأثیر، با استفاده از رابطهٔ $\Delta\sigma_z = qI_r$، اضافه تنش قائم در نقطهٔ A را محاسبه کنید.





m	n	I
۱	۱	۰/۱۷۵
۰/۵	۰/۵	۰/۰۸۵
۱	۰/۵	۰/۱۲

حل: برای محاسبهٔ اضافه تنش در نقطهٔ A، باید شکل پی را به مستطیل‌هایی تبدیل کنیم که در همهٔ آنها A در گوشهٔ مستطیل‌های جدید قرار داشته باشد. بنابراین خواهیم داشت:



در ادامه با توجه به شکل‌های فوق، $\Delta\sigma_{z_A}$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

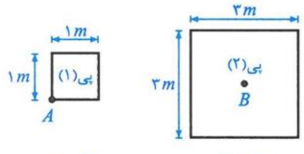
$$\Delta\sigma_{z_A} = q\left[I_{acAg} - I_{bcAh} - I_{fdAg} + I_{edAh}\right]$$

در نهایت برای محاسبهٔ I در چهار سطح فوق، از جدول داده شده در صورت سؤال، به‌صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$\Delta\sigma_{z_A} = I_r q \quad , \quad I_r = f(m,n) \quad , \quad m = \frac{L}{z} \quad , \quad n = \frac{B}{z}$$

$$\begin{cases} I_{acAg} = I\left(\frac{۲}{۲},\frac{۲}{۲}\right) = I(۱,۱) = ۰/۱۷۵ \\ I_{bcAh} = I_{fdAg} = I\left(\frac{۲}{۲},\frac{۱}{۲}\right) = I(۱,۰/۵) = ۰/۱۲ \quad \Rightarrow \quad \Delta\sigma_{z_A} = ۲۰۰\times(۰/۱۷۵ - ۲\times ۰/۱۲ + ۰/۰۸۵) = ۴\,kN/m^۲ \\ I_{edAh} = I\left(\frac{۱}{۲},\frac{۱}{۲}\right) = I(۰/۵,۰/۵) = ۰/۰۸۵ \end{cases}$$

تمرین ۱۵: پی‌های صلب (۱) و (۲) به‌ترتیب تحت بار قائم ۲۵ تن و ۱۸۰ تن در مرکز خود قرار دارند. اگر تنش قائم ایجاد شده در گوشه پی شمارهٔ (۱) در عمق ۱ متری برابر $۲/۵\,t/m^۲$ باشد، میزان تنش قائم ایجاد شده در مرکز پی شمارهٔ (۲) در عمق ۱/۵ متری چه میزان است؟ (سراسری - ۸۷)



شکل (۱) شکل (۲)

۱) $۲\,t/m^۲$

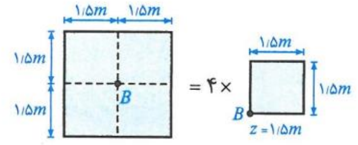
۲) $۲/۵\,t/m^۲$

۳) $۴\,t/m^۲$

۴) $۸\,t/m^۲$

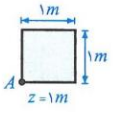
حل: برای محاسبهٔ تنش در نقطهٔ B از شکل (۲)، آن را به چهار مستطیل به‌صورت زیر تقسیم می‌کنیم و داریم:

شکل (۲):



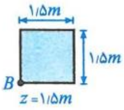
، تنش وارد بر سطح خاک: $q_۲ = \frac{۱۸۰}{۳\times۳} = ۲۰\,ton/m^۲$ ($۳\times۳ \rightarrow A_۲$)

شکل (۱):

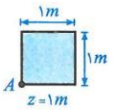


، $q_۱ = \frac{۲۵}{۱\times۱} = ۲۵\,ton/m^۲$ ($۱\times۱ \rightarrow A_۱$)

حال باید I را در این دو شکل مقایسه کنیم که خواهیم داشت:



$$\Rightarrow\ I_{۲} = I\,(m_{۲}\,,\,n_{۲}) = I\,(\frac{۱/۵}{۱/۵}\,,\,\frac{۱/۵}{۱/۵}) = I\,(۱,۱)$$



$$\Rightarrow\ I_{۱} = I\,(m_{۱},n_{۱}) = I\,(\frac{۱}{۱}\,,\,\frac{۱}{۱}) = I\,(۱,۱)$$

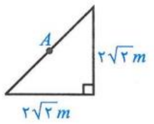
این موضوع یعنی $I_{۲}$ و $I_{۱}$ با هم برابر هستند و در ادامه می‌نویسیم:

$$\frac{(\Delta\sigma_{z_B})_{۲}}{(\Delta\sigma_{z_A})_{۱}} = \frac{q_{۲}\times ۴\times I_{۲}}{q_{۱}\times I_{۱}} \ \Rightarrow\ \frac{(\Delta\sigma_{z_B})_{۲}}{۲/۵} = \frac{۲۰\times ۴\,I\,(۱,۱)}{۲۵\times I(۱,۱)} \ \Rightarrow\ (\Delta\sigma_{z_B})_{۲} = ۸\ ton/m^{۲}$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

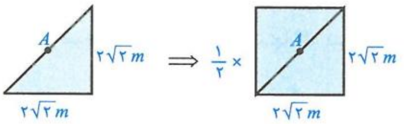
توجه: همانطور که مشاهده کردید، در این سؤال که در کنکور نیز بسیار پر تکرار بوده است، نیازی به دانستن مقدار $I\,(۱,۱)$ نبود.

تمرین ۱۶: در سطح بارگذاری شدهٔ شکل روبرو، مقدار اضافه تنش قائم در عمق ۴ متری نقطه A، معادل اضافه تنش قائم در کدام‌یک از سطوح بارگذاری زیر، تحت بارگذاری یکسان در همان عمق است؟ (مقدار اضافه تنش قائم از روش بوسینسک محاسبه می‌شود.)

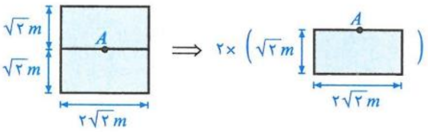


● حل: برای پاسخ دادن به این تمرین جالب، به موارد زیر دقت می‌کنیم:

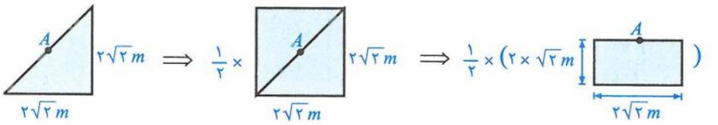
۱- با کمی فکر متوجه می‌شویم که اضافه تنش در زیر نقطهٔ A از پی نشان داده شده، نصف اضافه تنش در زیر نقطهٔ A از پی مربعی است:



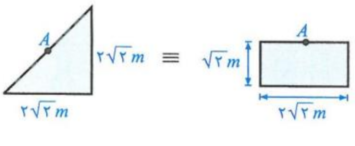
۲- در پی مربعی برای محاسبهٔ اضافه تنش در زیر A، می‌توان آن را به‌صورت دو مستطیل به‌صورت زیر در نظر گرفت:



۳- با توجه به موارد (۱) و (۲)، برای محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ در نقطهٔ A از پی مثلثی به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:



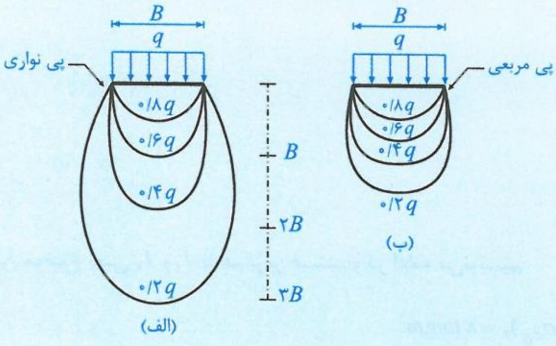
پس در نهایت می‌توان گفت:



بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

بررسی یک موضوع جالب

در زیرِ هریک از حالت‌های بارگذاری، نقاطی وجود دارند که افزایش تنش آنها باهم برابر است. این نقاط در حالت دوبعدی برروی منحنی‌ها و در حالت سه‌بعدی برروی رویه‌های فضایی قرار می‌گیرند که حباب (پیاز) تنش نامیده می‌شوند. به عبارت دیگر می‌توان گفت؛ حباب تنش مکان هندسی نقاطی است که افزایش تنش همه آنها باهم مساوی و یکسان می‌باشد. در شکل زیر حباب‌های تنش برای دو پی نواری و مربعی نشان داده شده است که دارای عرض مشابه و بارگذاری یکسانی می‌باشند.



B-۷- مقایسهٔ روش بوسینسک و وسترگارد

همانطورکه گفتیم روش بوسینسک برای خاک‌های همگن مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای خاک‌های لایه‌ای و غیر همگن نمی‌توان از این روش استفاده کرد و باید از روش وسترگارد استفاده شود. با توجه به پیچیده بودن روابط این روش، احتمال طرح سؤال از آن در کنکور ضعیف بوده و تنها ممکن است از تفاوت‌های این روش با روش بوسینسک سؤال مطرح شود که در ادامه به آن می‌پردازیم.

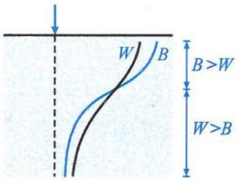
این تفاوت‌ها عبارتند از:

۱) روش وسترگارد لایهٔ خاک را از طرفین محدود کرده و روش بوسینسک خاک را محدود نکرده و اجازهٔ تغییر شکل جانبی به آن می‌دهد.

۲) فرضیات وسترگارد برای خاک‌های رسی و فرضیات بوسینسک برای خاک‌های ماسه‌ای معقول‌تر است.

۳) روش وسترگارد ضریب پواسون خاک را در روابط خود وارد می‌کند، این در حالی است که روش بوسینسک چنین کاری نمی‌کند.

۴) با بررسی روابط بوسینسک و وسترگاد می‌توان فهمید که در نواحی نزدیک به سطح زمین و در عمق کم، $\Delta\sigma_z$ محاسبه شده از روش بوسینسک نسبت به روش وسترگارد اعداد بزرگتری را نتیجه می‌دهد در حالی‌که در نواحی دور از سطح زمین، برعکس است. این موضوع نشان می‌دهد که استهلاک تنش در روش بوسینسک از وسترگارد سریع‌تر انجام می‌شود.

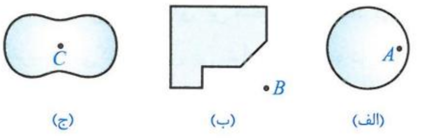


B: بوسینسک

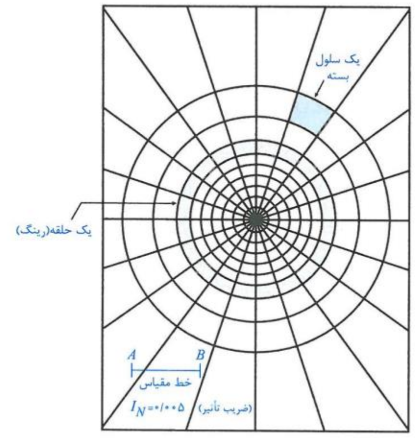
W : وسترگارد

C-۱- منحنی‌های نیومارک و خصوصیات آنها

شکل‌های زیر، سه نقطهٔ A، B و C را نشان می‌دهند که مربوط به سه سطح بارگذاری، با شدت تنش یکنواخت، می‌باشند. فرض کنید که محاسبهٔ اضافه تنش قائم در زیر هریک از این نقاط،در یک عمق دلخواه مدنظر ما باشد که در آنصورت با روش‌ها و روابط ارائه شدهٔ در قسمت قبلی قادر به تعیین $\Delta\sigma_z$ نخواهیم بود. در این شرایط، روش مناسب برای تعیین $\Delta\sigma_z$، استفاده از منحنی‌های نیومارک است.



درحالت کلی اگر بارگذاری شکل متفاوتی نسبت به حالت‌های منظم قبل را داشته باشد یا در نقطه‌ای دیگر از زیر پی (متفاوت با آنچه قبلاً مشخص شده بود) اضافه تنش قائم خواسته شود، در آنصورت برای تعیین $\Delta\sigma_z$ در هر عمق دلخواه، از روش منحنی نیومارک استفاده خواهیم کرد. منحنی‌های نیومارک براساس تئوری بوسینسک ارائه شده‌اند و در شکل زیر، یک نمونهٔ ترسیم شده از نمودار نیومارک، نشان داده شده است:



باتوجه به شکل نشان داده شده می‌توان گفت:

۱) نمودار نیومارک از تعدادی دایرهٔ هم‌مرکز تشکیل شده است که توسط خطوط شعاعی با فاصلهٔ مساوی به قطعات کوچکتری تقسیم‌بندی شده‌اند. هریک از این قطعات را **سلول بسته** یا **چشمه** می‌نامیم.

۲) هریک از سلول‌های بسته ارزش یکسانی در تولید تنش در زیر نقطهٔ مرکز (منظور مرکز دایره‌هاست) دارند، یعنی اگر به‌طور یکسان بارگذاری شوند (q همهٔ آنها یکسان باشد)، اضافه تنش قائمی که در یک نقطه زیر مرکز ایجاد می‌کنند، باهم برابر است. بنابراین هر سلول بسته به اندازه $\frac{1}{N}$ (N تعداد کل سلول‌های بسته است) در محاسبه اضافه تنش قائم زیر مرکز تأثیرگذار خواهد بود. از این‌رو $\frac{1}{N}$ را **ضریب تأثیر نمودار** نامیده و آن را با I_N نشان می‌دهیم.

۳) تعداد سلول‌های بسته برابر است با تعداد حلقه‌ها ضرب در تعداد خطوط شعاعی، مثلاً در شکل رسم شده ۱۰ حلقه و ۲۰ خط شعاعی داریم. پس N برابر $۲۰۰ = ۲۰ \times ۱۰$ بوده و $I_N = \frac{۱}{۲۰۰} = ۰/۰۰۵$ است.

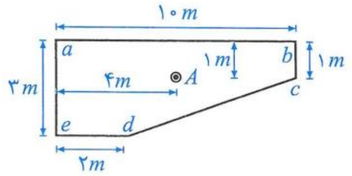
۴) واحد طول برای رسم دوایر، پاره‌خط AB بوده است که به آن خط مقیاس می‌گوییم. انتخاب خط مقیاس دلخواه و اختیاری است.

قسمت سوم روش منحنی نیومارک

زیر شاخه‌های قسمت سوم

C-۱- منحنی‌های نیومارک و خصوصیات آنها
C-۲- نحوهٔ محاسبهٔ اضافه تنش قائم با استفاده از روش منحنی نیومارک

C-۲- نحوهٔ محاسبهٔ اضافه تنش قائم با استفاده از روش منحنی نیومارک



شکل مقابل یک پی ساختمانی را نشان می‌دهد که تحت تنش یکنواخت $200kPa$ قرار گرفته است. می‌خواهیم با استفاده از روش منحنی نیومارک اضافه تنش قائم در عمق ۴ متری را در زیر نقطهٔ A به‌دست آوریم.

برای محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ در نقطهٔ خواسته شده، به‌ترتیب گام‌های زیر عمل می‌کنیم:

گام اول: سطح بارگذاری (پی) را با مقیاس مناسب رسم می‌کنیم. برای این منظور ابتدا ابعاد پی را بر عمق z تقسیم کرده و سپس با ضرب کردن عدد به‌دست آمده در خط مقیاس، پی را ترسیم می‌کنیم. برای پی نشان داده شده در شکل بالا می‌توان نوشت:

$$ab = 10\,m \text{ واقعی} \Rightarrow ab = (\frac{L}{z})AB = (\frac{10}{4})AB = 2/5\,AB \text{ ترسیمی}$$

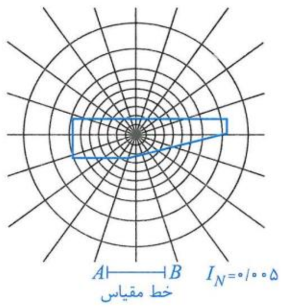
$$bc = 1\,m \text{ واقعی} \Rightarrow bc = (\frac{1}{4})AB = 0/25\,AB \text{ ترسیمی}$$

$$de = 2\,m \text{ واقعی} \Rightarrow de = (\frac{2}{4})AB = 0/5\,AB \text{ ترسیمی}$$

$$ea = 3\,m \text{ واقعی} \Rightarrow ea = (\frac{3}{4})AB = 0/75\,AB \text{ ترسیمی}$$

حال اگر طول AB (خط مقیاس) مثلاً $2cm$ باشد، در آنصورت اندازهٔ ترسیمی ابعاد فوق به‌ترتیب برابر ۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتیمتر می‌شود.

گام دوم: سطح بارگذاری رسم شده در گام اول را طوری روی نمودار نیومارک قرار می‌دهیم تا نقطه‌ای که هدف تعیین افزایش تنش قائم در زیر آن است، در مرکز نمودار قرار گیرد. در شکل مقابل سطح بارگذاری موردبحث را به همین ترتیب روی نمودار نیومارک قرار داده‌ایم.



گام سوم: تعداد سلول‌های بسته محصور شده (توسط پلان سطح بارگذاری) شمارش می‌شوند که آن را با M نشان می‌دهیم. در اینجا با شمارش $M = 61$ به‌دست می آید.

گام چهارم: افزایش تنش قائم ناشی از بار گسترده q را در نقطهٔ موردنظر، به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\Delta\sigma_z = q \times I \quad , \quad I = M \times I_N \Rightarrow \boxed{\Delta\sigma_z = q\,MI_N}$$

که در این مثال خواهیم داشت:

$$\Delta\sigma_z = 0/005 \times 200 \times 61 = 61\ kPa$$

تمرین ۱۷: اگر در تعیین تنش‌های ایجاد شده در خاک با استفاده از روش منحنی نیومارک تعداد حلقه‌ها دو برابر و خطوط شعاعی نصف شوند، در آن صورت ضریب تأثیر نمودار (I_N) چند برابر خواهد شد؟

حل:

$$N = \text{تعداد حلقه‌ها} \times \text{تعداد خطوط شعاعی} \quad \text{و} \quad I_N = \frac{1}{N}$$

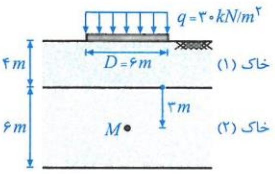
با دو برابر شدن تعداد حلقه‌ها و نصف شدن خطوط شعاعی، N ثابت مانده و درنتیجه I_N نیز تغییر نخواهد کرد.

تمرین ۱۸: در ترسیم نمودار نیومارک ۱۰ حلقه و ۱۶ خط شعاعی به‌دست آمده است. اگر پلان ترسیم‌شدهٔ پی با مقیاس مناسب، ۲۴/۴ سلول از نمودار نیومارک را در بر بگیرد، در آنصورت اضافه تنش قائم در نقطهٔ موردنظر چقدر خواهد بود؟ بارگذاری یکنواخت بوده و شدت آن برابر $20\,t/m^2$ است.

حل:

$$\Delta\sigma_z = q\,MI_N \ , \ I_N = \frac{1}{N} = \frac{1}{10 \times 16} = \frac{1}{160} \Rightarrow \Delta\sigma_z = (20)(24/4)(\frac{1}{160}) = 3/05\ t/m^2$$

تمرین ۱۹: اضافه تنش قائم در نقطه M ناشی از بارگذاری دایره‌ای به شدت $۳۰\,kN/m^۲$ و شعاع $۳m$ کدام است؟ برای محاسبه اضافه تنش قائم در خاک (۱) از روش تقریبی ۲ به ۱ و در خاک (۲) از روش تقریبی ۳ به ۱ استفاده شود.



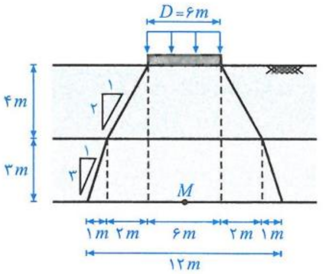
۱) $۷/۵\,kN/m^۲$

۲) $۳/۷۵\,kN/m^۲$

۳) $۱۵\,kN/m^۲$

۴) $۲/۷\,kN/m^۲$

پاسخ با ترسیم نمودار توزیع تنش خواهیم داشت:

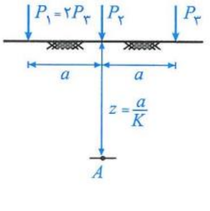


$$q \times A = \Delta\sigma_{z_{(M)}} \times A'$$

$$\Rightarrow \quad \Delta\sigma_{z_{(A)}} = q\left(\frac{A}{A'}\right) = ۳۰ \times \frac{\left(\frac{\pi}{۴}\times ۶^۲\right)}{\left(\frac{\pi}{۴}\times ۱۲^۲\right)} = \frac{۳۰}{۴} = ۷/۵\,kN/m^۲$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۲۰: در شکل زیر $\gamma = ۲۰\,kN/m^۳$، $\nu = ۰/۳$، $K_۰ = ۰/۳۵$ و $P_۱ = ۲P_۳$ می‌باشد. مقدار $P_۱$ را چنان تعیین کنید که مجموع اثر بارهای $P_۱$ و $P_۳$ با اثر بار $P_۲$ در نقطه A برابر باشد.



۱) $۳P_۲(۱+K^۲)^{۲/۵}$

۲) $\frac{۲}{۳}P_۲(۱+K^۲)^{۲/۵}$

۳) $۲P_۲(۱+K^۲)^{۲/۵}$

۴) $\frac{۳}{۲}P_۲(۱+K^۲)^{۲/۵}$

پاسخ طبق صورت سؤال داریم:

$$\Delta\sigma_{z_۱} + \Delta\sigma_{z_۳} = \Delta\sigma_{z_۲}$$

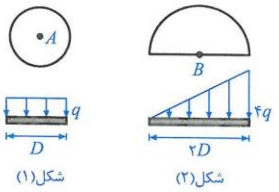
به منظور محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ ها، از روابط بوسینسک برای بار متمرکز استفاده می‌کنیم و اطلاعات داده شده در صورت سؤال را در رابطه محاسبه $\Delta\sigma_z$ جایگذاری کرده و می‌نویسیم:

$$\frac{۳P_۱}{۲\pi z^۲}\left[\frac{۱}{۱+\left(\frac{a}{\frac{a}{K}}\right)^۲}\right]^{\frac{۵}{۲}} + \frac{۳\boxed{P_۳}}{۲\pi z^۲}\left[\frac{۱}{۱+\left(\frac{a}{\frac{a}{K}}\right)^۲}\right]^{\frac{۵}{۲}} = \frac{۳P_۲}{۲\pi z^۲} \qquad \left(P_۳ \rightarrow \frac{۱}{۲}P_۱\right)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{P_۱}{(۱+K^۲)^{۲/۵}} + \frac{\frac{۱}{۲}P_۱}{(۱+K^۲)^{۲/۵}} = P_۲ \quad \Rightarrow \quad P_۱ = \frac{۲}{۳}P_۲(۱+K^۲)^{\frac{۵}{۲}}$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۴۱: اضافه تنش قائم در نقطه A که مطابق شکل (۱) در عمق z زیر مرکز دایره‌ای به قطر D قرار گرفته است، برابر σ_z است. اگر نقطه B در بارگذاری شکل (۲) در عمق $2z$ زیر مرکز نیم‌دایره‌ای به شعاع D باشد، در آن‌صورت اضافه تنش قائم در نقطه B کدام است؟ (برای محاسبه اضافه تنش از روش بوسینسک استفاده کنید.)



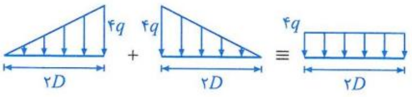
۱) σ_z

۲) $1/5\sigma_z$

۳) $2\sigma_z$

۴) $3\sigma_z$

پاسخ: در شکل (۲)، یک بارِ مثلثی بر نیم‌دایره اعمال می‌شود که اگر یک بار مثلثی معادلش را به‌صورت زیر با آن جمع کنیم، بـار یکنواخـت با شدت $4q$ حاصل می‌گردد.



از آن جایی که دو بار مثلثی به دلیل تقارن شکل، تأثیر یکسانی بر نقطه B دارند، پس اضافه تنش قائم در نقطهٔ B نصف حالتی است که بار گستردهٔ $4q$ بر روی آن اعمال شود.

در بارگذاری گسترده برروی سطح دایره، اضافه تنش قائم در عمق z در مرکز دایره‌ای به شعاع R برابر است با:

$$\Delta\sigma_z = q\left[1-\left(\frac{1}{1+(\frac{R}{z})^2}\right)^{\frac{3}{2}}\right]$$

همانطورکه در متن درس گفته شد (بخش B-۵) اگر در دو بارگذاری دایره‌ای نسبت $\frac{r_0}{z}$ یکسان باشـد در آن‌صـورت: $\frac{\Delta\sigma_{z(2)}}{\Delta\sigma_{z(1)}} = \frac{q_2}{q_1}$ اسـت.

بنابراین در حل این سؤال خواهیم داشت:

$$\begin{cases} (\frac{r_0}{z})_A = \frac{\frac{D}{2}}{z} = \frac{D}{2z} \\ (\frac{r_0}{z})_B = \frac{D}{2z} \end{cases} \Rightarrow (\frac{r_0}{z})_A = (\frac{r_0}{z})_B \Rightarrow \frac{\Delta\sigma_{z(B)}}{\Delta\sigma_{z(A)}} = \frac{q_B}{q_A}$$

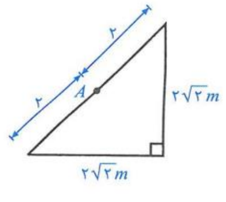
از طرفی سطح بارگذاری شده در شکل (۲) یک نیم‌دایره است، بنابراین اضافه تنش قائم در نقطهٔ B نصف حالت یک دایره کامل خواهد بـود و می‌نویسیم:

(به خاطر نیم‌دایره بودن) (به خاطر مثلثی بودن)

$$\frac{\Delta\sigma_{z(B)}}{\Delta\sigma_{z(A)}} = \frac{\frac{1}{2}\times 4q \times \frac{1}{2}}{q} = 1 \Rightarrow \Delta\sigma_{z(B)} = \Delta\sigma_{z(A)} = \sigma_z$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۴۲: بار گسترده‌ای به شدت $30\,kN/m^2$ مطابق شکل روبرو بر یک سطح مثلثی اعمال مـی‌شـود. مقـدار اضافه تنش قائم در عمق ۴ متری از نقطه A به روش بوسینسک چقدر است؟ (به ازای $n = m = \frac{\sqrt{2}}{4}$ مقدار I_r را در رابطه‌ی $\Delta\sigma = qI_r$ برابر با ۰/۰۴۵ درنظر بگیرید.)



۱) $1/35\,kN/m^2$

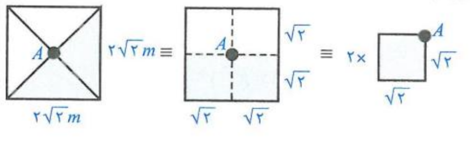
۲) $2/7\,kN/m^2$

۳) $0/675\,kN/m^2$

۴) $4/05\,kN/m^2$

پاسخ: رابطه‌ای که در صورت سؤال به آن اشاره شده است $(\Delta\sigma_z = q\cdot I_r)$ مربوط به سطح مستطیلی است، بنابراین برای حـل ایـن سـؤال بایستی یک سطح بارگذاری مستطیلی معادل با سطح بارگذاری موردنظر، به‌دست آوریم.

مطابق شکل مقابل مانند تمرین (۱۶) در متن درس عمل کرده و می‌نویسیم:

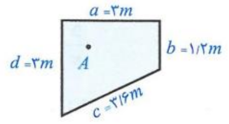


در مربعی به ضلع $۲\sqrt{}$ داریم:

$$\begin{cases} m = \dfrac{B}{z} = \dfrac{\sqrt{۲}}{۴} \\ n = \dfrac{L}{z} = \dfrac{\sqrt{۲}}{۴} \end{cases} \Rightarrow I_r = ۰/۰۴۵ \Rightarrow \Delta\sigma_z = ۲(q \times I_r) = ۲ \times ۳۰ \times ۰/۰۴۵ = ۲/۷\ kN/m^۲$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۲۳: شکل زیر یک پی ساختمانی را نشان می‌دهد که تحت تنش یکنواخت $۱۰۰\ kN/m^۲$ قرار گرفته است. می‌خواهیم با استفاده از روش منحنی نیومارک، اضافه تنش قائم در عمق ۶ متری در زیر نقطهٔ A را به‌دست آوریم. اگر خط مقیاس $۲/۵\ cm$ باشد، در آن‌صورت ابعاد ترسیمی a، b، c و d به‌ترتیب چند سانتی‌متر خواهند بود؟



۱) ۰/۵ و ۰/۲ و ۰/۶ و ۰/۵
۲) ۱/۲۵ و ۰/۵ و ۱/۵ و ۱/۲۵
۳) ۵ و ۲ و ۶ و ۵
۴) ۷/۵ و ۳ و ۹ و ۷/۵

● پاسخ: باتوجه به مطالب گفته شده در متن درس (قسمت سوم، بخش C-۲)، می‌نویسیم:

$$\text{ترسیمی } a = \left(\frac{a}{z}\text{واقعی}\right) AB = \left(\frac{۳}{۶}\right)(۲/۵) = ۱/۲۵\ cm$$

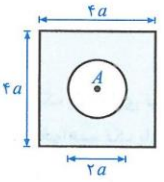
$$\text{ترسیمی } b = \left(\frac{b}{z}\text{واقعی}\right) AB = \left(\frac{۱/۲}{۶}\right)(۲/۵) = ۰/۵\ cm$$

$$\text{ترسیمی } c = \left(\frac{c}{z}\text{واقعی}\right) AB = \left(\frac{۳/۶}{۶}\right)(۲/۵) = ۱/۵\ cm$$

$$\text{ترسیمی } d = \left(\frac{d}{z}\text{واقعی}\right) AB = \left(\frac{۳}{۶}\right)(۲/۵) = ۱/۲۵\ cm$$

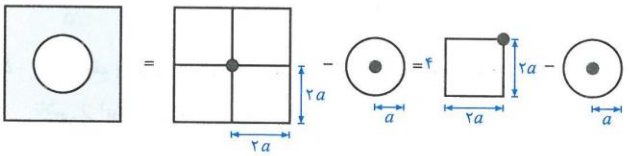
بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

تمرین ۲۴: دو پی مربعی و دایره‌ای به‌ترتیب به ضلع a و شعاع $۱/۵a$ تحت بارگذاری یکسان به شدت Q قرار گرفته‌اند که اضافه تنش قائم در عمق z زیر گوشه پی مربعی با اضافه تنش قائم در عمق $۳z$ زیر مرکز پی دایره‌ای یکسان و برابر $\Delta\sigma$ است. در شکل زیر اضافه تنش قائم تحت بارگذاری $۲Q$ در ناحیه هاشورخورده، در عمق $۲z$ زیر نقطهٔ A کدام است؟



۱) $\frac{۳}{۴}\Delta\sigma$
۲) $\frac{۳}{۲}\Delta\sigma$
۳) $۳\Delta\sigma$
۴) $۶\Delta\sigma$

● پاسخ:



برای پی مربعی $(۲a \times ۲a)$، اضافه تنش قائم در زیر گوشه بار و در عمق $۲z$ برابر است با:

$$\Delta\sigma_z = q \times I_s = ۲Q \times I\left(\frac{۲a}{۲z}, \frac{۲a}{۲z}\right) = ۲\left[Q \times I\left(\frac{a}{z}, \frac{a}{z}\right)\right] = ۲\Delta\sigma$$

و برای پی دایره‌ای (شعاع a) نیز اضافه تنش قائم در زیر مرکز دایره و در عمق $۲z$ برابر خواهد بود:

$$\Delta\sigma_z = q \times I_c = ۲Q \times I\left(\frac{R}{z} = \frac{a}{۲z}\right) = ۲\left[Q \times I\left(\frac{R}{z} = \frac{۱/۵a}{۳z}\right)\right] = ۲\Delta\sigma$$

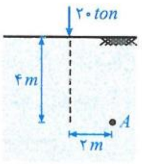
بنابراین برای پی نشان داده شده در شکل خواهیم داشت:

$$\Delta\sigma_z = ۴ \times ۲\Delta\sigma - ۲\Delta\sigma = ۶\Delta\sigma$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تست‌های فصل ششم

۱- بار متمرکز ۲۰ تن بر بالای لایه‌ای از خاک همگن وارد می‌شود. فشار ایجاد شده ناشی از این بار در نقطهٔ A در عمــق ۴ متــری از محــور بــار تقریباً چند $t/m^۲$ می‌باشد؟ (سراسری - ۷۲)



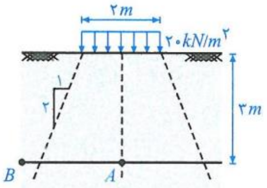
۱) $\frac{۱۵}{۷\pi}$

۲) $\frac{۱۵}{۸\pi}$

۳) $\frac{۱۲}{\pi}$

۴) $\frac{۵}{\pi}$

۲- بار نواری به شدت $q = ۲۰\,kN/m^۲$ بر سطح زمین اعمال می‌شود. با فرض توزیع تنش تقریبی (۲ به ۱) در عمق سه متری زمین، تــنش ایجــاد شده در نقاط A و B به‌ترتیب چند $kN/m^۲$ می‌باشد؟ (سراسری - ۸۱)



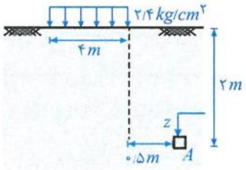
۱) ۶/۶ و ۰

۲) ۸ و ۰

۳) ۸ و ۴

۴) ۶/۶ و ۳/۳

۳- برروی یک پی نواری شکل به عرض ۴ متر فشار یکنواخت ۲/۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع وارد می‌شود. تعیین کنید در نقطه‌ای به عمــق ۲ متر در زیر پی (مطابق شکل زیر) از روابط تقریبی چه مقدار از این فشار (برحسب $kg/cm^۲$) منتقل می‌شود؟ (سراسری - ۸۳)



۱) ۳/۲

۲) ۲/۴

۳) ۱/۶

۴) ۰/۸

۴- یک بارگذاری نواری به عرض B و شدت q مفروض است. چنانچه محاسبه اضافه تنش قائم در عمــق $z = ۵B$ از زیــر بــار مــدنظر باشــد و بخواهیم یک بار با روش تقریبی دو به یک و بار دیگر با روش تقریبی ۲/۵ به ۱ آن را محاسبه کنیم، در آن‌صورت نسبت اضافه تنش محاسبه شده در روش ۲ به ۱ به اضافه تنش محاسبه شده در روش ۲/۵ به ۱ کدام است؟

۱) $\frac{۶}{۵}$ ۲) ۱ ۳) $\frac{۵}{۶}$ ۴) $\frac{۴}{۵}$

۵- یک سیلو به قطر ۸ متر تنش یکنواخت به شدت $۹\,kg/m^۲$ بر سطح زمین وارد می‌نماید. با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱ میزان تنش وارده ناشی از این سیلو در عمق ۲ متری از سطح زمین برابر کدامیک از مقادیر زیر خواهد بود؟ (برحسب $kg/m^۲$)

۱) ۴/۶۷ ۲) ۵/۷۶ ۳) ۳/۲۴ ۴) ۶/۲۵

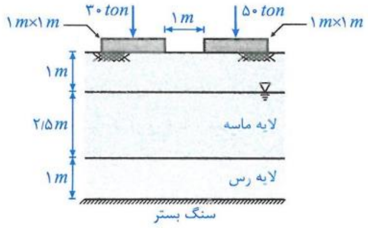
۶- برروی یک پی دایره‌ای شکل به شعاع ۱ متر، بار گسترده $q_۰ = ۳/۲$ (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) وارد می‌شود. تعیین نمائیــد در نقطــه‌ای در امتداد محیط این پی و برحسب $kg/cm^۲$ در عمق ۲ متری چه مقدار فشار وارد می‌شود؟ (سراسری - ۸۸)

۱) ۱/۶ ۲) ۰/۸۰ ۳) ۰/۵۰ ۴) ۰/۳۵

۷- مخزنی به قطر ۵/۰ متر فشاری معادل ۲/۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بر سطح زمینی که ظرفیت باربری آن ۰/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربــع است وارد می‌کند. با استفاده از روش تقریبی تنش‌ها (۲ به ۱) ضخامت خاکریزی که لازم است فشار مخزن را از مقدار موجود به حــد تحمــل خاک تقلیل دهد، حساب کنید. (از وزن خاکریز صرفنظر می‌شود) (سراسری - ۷۴)

۱) ۰/۵ متر ۲) ۵ متر ۳) ۰/۲۵ متر ۴) ۲/۵ متر

۸- مطابق شکل زیر دو شالودهٔ مربعی تحت بارهای متمرکز بدون خروج از مرکزیت به فاصله یک متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. چنانچه بارگذاری در یک زمان انجام شود، افزایش تنش در وسط لایه رس برابر کدام گزینه است؟ (بهتر است از روش تقریبی با شیب ۲ به ۱ برای محاسبه افزایش تنش در عمق استفاده کنید.) (سراسری - ۷۹)



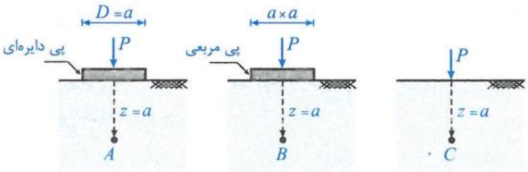
۱) $۳۲۰۰ kg/m^۲$

۲) $۱۶۰۰ kg/m^۲$

۳) $۲۰۰۰ kg/m^۲$

۴) $۱۲۰۰ kg/m^۲$

۹- باتوجه به شکل زیر و با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱، کدام عبارت در مورد اضافه تنش قائم ایجاد شده در نقاط A و B و C صحیح است؟



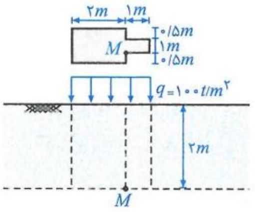
۱) $\Delta\sigma_{z_A} > \Delta\sigma_{z_B} > \Delta\sigma_{z_C}$

۲) $\Delta\sigma_{z_C} > \Delta\sigma_{z_B} > \Delta\sigma_{z_A}$

۳) $\Delta\sigma_{z_A} > \Delta\sigma_{z_C} > \Delta\sigma_{z_B}$

۴) $\Delta\sigma_{z_C} > \Delta\sigma_{z_A} > \Delta\sigma_{z_B}$

۱۰- بار یکنواختی به شدت $۱۰۰ \; t/m^۲$ روی یک پی به شکل زیر وارد شده است. با استفاده از روش ذوزنقه‌ای (تقریبی)، اضافه تنش قائم در عمق ۲ متری زمین (در نقطهٔ M) چند $kg/cm^۲$ می‌باشد؟ (خاک منطقه درشت‌دانه است)



۱) ۱/۱

۲) ۰/۴

۳) ۱/۵

۴) ۰/۷

۱۱- کدامیک از فرضیات زیر جزء فرضیات توزیع تنش بوسینسک <u>نمی‌باشد</u>؟ (سراسری - ۷۴)

۱) خاک بی‌وزن است.

۲) تغییرحجم خاک قابل اغماض است.

۳) تغییرشکل جانبی لایه‌های خاک صفر درنظر گرفته شده است.

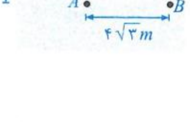
۴) قبل از اعمال بار P، هیچگونه بار دیگری روی خاک قرار نگرفته است.

۱۲- بار متمرکز Q را روی سطح زمین تصور کنید. اگر تأثیر این بار در عمق ۱ متری σ_z باشد، براساس روش بوسینسک، در عمق ۳ متری مقدار اضافه تنش عبارت است از: (سراسری - ۷۳)

۱) $\frac{۲\sigma_z}{۳\pi}$ ۲) $\frac{\sigma_z}{۹\pi}$ ۳) $\frac{\sigma_z}{۶\pi}$ ۴) $\frac{\sigma_z}{۹}$

۱۳- در شکل زیر بار متمرکز P بر سطح خاک وارد می‌شود. اضافه تنش قائم ایجاد شده در نقطهٔ A چند برابر اضافه تنش قائم در نقطه B است؟

(از روش بوسینسک استفاده کنید، $\Delta\sigma_z = \frac{۳P}{۲\pi}\frac{z^۳}{R^۵}$)



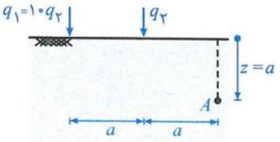
۱) ۱۶

۲) ۳۲

۳) ۶۴

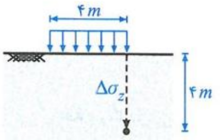
۴) ۱۲۸

۱۴- در شکل زیر، اضافه تنش قائم در نقطهٔ A ناشی از بار خطی q_1، چند برابر اضافه تنش قائم در همین نقطه تحت اثر بار خطی q_2 است؟ ($\Delta\sigma_z = \frac{2Qz^3}{\pi R^4}$)



۱) ۰/۴
۲) ۱/۶
۳) ۲/۵
۴) ۴

۱۵- یک بار نواری به شدت $\bar{q}$ به عرض ۴/۰ متر بر روی سطح زمین وارد می‌شود. مقدار تنش قائم ($\Delta\sigma_z$) ناشی از بار فوق‌الذکر در زیر حاشیه سطح بارگذاری و در عمق ۴/۰ متری از سطح زمین چقدر است؟ ($\pi = 3$) (سراسری - ۷۸)

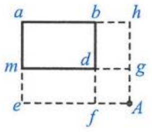


۱) $0/25\bar{q}$
۲) $0/41\bar{q}$
۳) $0/5\bar{q}$
۴) $0/62\bar{q}$

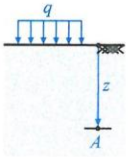
۱۶- شدت بار یک پی‌نواری به عرض ۲ متر برابر ۱۰ kN/m^2 می‌باشد. حداکثر تنش عمودی ناشی از اعمال این بار در عمق ۶ متری زیر پی مساوی ۲ kN/m^2 می‌باشد. اگر عرض پی به ۴ متر افزایش یابد و شدت بار ثابت بماند، حداکثر تنش قائم در عمق ۱۲ متری برحسب kN/m^2 برابر خواهد بود با: (سراسری - ۸۳)

۱) ۲
۲) ۴
۳) ۱
۴) ۱/۴۱

۱۷- برای محاسبه تنش در نقطه A (خارج از محدوده پی) ناشی از بارگذاری پی مستطیل شکل ($abdm$) با استفاده از رابطه $\sigma_v = I.q$، از چه سطح بارگذاری‌های مجازی استفاده می‌شود؟ (سراسری - ۸۲)



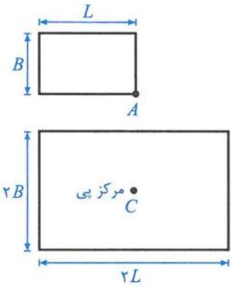
پلان



مقطع

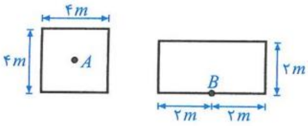
۱) $\sigma_{abdm} + \sigma_{dgAf}$
۲) $\sigma_{aheA} - \sigma_{bhfA} - \sigma_{mdef}$
۳) $\sigma_{ahAe} - \sigma_{bhAf} - \sigma_{mgAe} + \sigma_{dgAf}$
۴) $\sigma_{abdm} + \sigma_{ahAe} - \sigma_{ahgm} - \sigma_{mgAe}$

۱۸- دو پی با مشخصات داده شده در شکل تحت بار قائم یکسان قرار دارند. نسبت تنش در عمق z در نقطه A (در پی اول) به نقطه C (در پی دوم) چقدر است؟ ($\frac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_C}} = ?$) (سراسری - ۸۵)



۱) ۰/۲۵
۲) ۱
۳) ۲
۴) ۴

۱۹- دو شالوده یکی مربعی و دیگری مستطیلی مطابق شکل به‌ترتیب بارهای ۲۰۰ و ۱۰۰ تنی را که به مرکز آن‌ها وارد می‌شود، به سطح خاک منتقل می‌کنند. اضافه تنش قائم در عمق ۲ متری در نقطه A چند برابر اضافه تنش قائم ایجاد شده در همان عمق در نقطهٔ B است؟ (برای محاسبه اضافه تنش از حل بوسینسک استفاده کنید.)



۱) ۱
۲) ۲
۳) $\frac{1}{2}$
۴) $\frac{3}{2}$

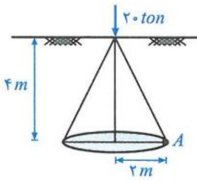
۲۰- کدام گزینه درمورد منحنی‌های تأثیر نیومارک صحیح نیست؟ (سراسری - ۸۰)

۱) برای هر نوع سطح بارگذاری شده در هر عمق دلخواهی می‌توان تنش‌های قائم را تعیین کرد.
۲) هیچگونه شرطی بین ابعاد سطح بارگذاری شده و عمق موردنظر برای تعیین تنش قائم وجود ندارد.
۳) اگر نقطهٔ موردنظر برای تعیین تنش قائم در محدودهٔ سطح بارگذاری باشد، معتبر است.
۴) سطح بارگذاری شده بین دو دایرهٔ متوالی، تنش‌های قائم یکسان در عمق مفروض، در مرکز دوایر متحدالمرکز ایجاد می‌نماید.

پاسخ تست‌های فصل ششم

۱- (۴)

طبق روابطِ روش تقریبی ۲ به ۱ (چون در صورت سؤال گفته تقریباً چقدر است) برای بار متمرکز خواهیم داشت:



$$\Delta\sigma_{z_A} = \frac{۴P}{\pi z^۲} = \frac{۴\times ۲۰}{\pi \times ۴^۲} = \frac{۵}{\pi}\ ton/m^۲$$

توجه: مطابق شکل رسم شده، نقطهٔ A درست روی مرز محدودهٔ توزیع تنش قرار می‌گیرد و به همین علت $\Delta\sigma_{z_A}$ مخالف صفر خواهد بود.

۲- (۲)

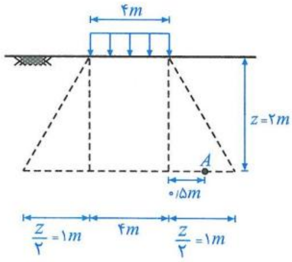
طبق رابطهٔ روش تقریبی ۲ به ۱ برای بارگذاری نواری، $\Delta\sigma_{z_A}$ برابر می‌شود با:

$$\Delta\sigma_{z_A} = q\left(\frac{B}{B+z}\right) = ۲۰\times\left(\frac{۲}{۲+۳}\right) = ۸\ kN/m^۲$$

همچنین در شکل رسم شده، نقطهٔ B خارج از محدودهٔ توزیع تنش قرار دارد و به همین علت $\Delta\sigma_{z_B}$ طبق این روش صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳- (۳)

مشابه با تست قبل، با توجه به رابطهٔ روش تقریبی ۲ به ۱ برای بارگذاری نواری خواهیم داشت:

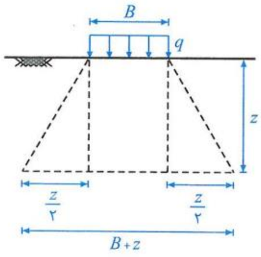


$$\Delta\sigma_{z_A} = q\left(\frac{B}{B+z}\right) = ۲/۴\times\left(\frac{۴}{۴+۲}\right) = ۱/۶\ kg/cm^۲$$

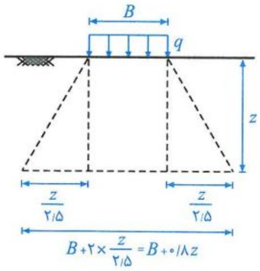
توجه کنید که نقطهٔ A، داخل محدودهٔ توزیع تنش قرار می‌گیرد (مطابق شکل) و به‌همین علت $\Delta\sigma_{z_A}$ مخالف صفر است.

۴- (۳)

تفاوت $\Delta\sigma_z$ در این دو حالت، به علت یکسان نبودن مساحت A' (مساحت تأثیر تنش) در عمق $z = ۵B$ می‌باشد. در شکل زیر ابعاد لازم برای محاسبهٔ مساحت A' برای هر دو روش، نشان داده شده است:



روش تقریبی ۲ به ۱



روش تقریبی ۲/۵ به ۱

در ادامه نسبت خواسته شده به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} \text{روش تقریبی ۲ به ۱}: \Delta\sigma_{z_1} = q\,\dfrac{B}{B+z} \\ \text{روش تقریبی ۲/۵ به ۱}: \Delta\sigma_{z_2} = q\,\dfrac{B}{B+۰/۸z} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta\sigma_{z_1}}{\Delta\sigma_{z_2}} = \frac{q\left(\frac{B}{B+z}\right)}{q\left(\frac{B}{B+۰/۸z}\right)} = \frac{B+۰/۸z}{B+z} \xrightarrow{z=۵B} \frac{\Delta\sigma_{z_1}}{\Delta\sigma_{z_2}} = \frac{B+۰/۸\times ۵B}{B+۵B} = \frac{۵}{۶}$$

۵- (۲)

با استفاده از رابطهٔ روش تقریبی ۲ به ۱ برای بارگذاری در سطح دایروی، خواهیم داشت:

$$\Delta\sigma_z = q\left[\frac{D}{D+z}\right]^{۲} = ۹\times\left[\frac{۸}{۸+۲}\right]^{۲} = ۵/۷۶\ kg/m^{۲}$$

۶- (۲)

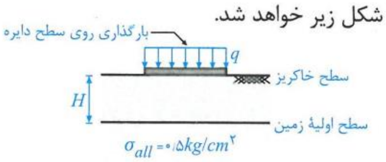
واضح است که نقطهٔ مذکور (در امتداد محیط پی) براساس روش تقریبی ۲ به ۱ در محدودهٔ توزیع تنش واقع می‌شود و بنابراین با استفاده از روابط این روش تقریبی برای بارگذاری در سطح دایروی، خواهیم داشت:

$$\Delta\sigma_z = q\,(\frac{D}{D+z})^{۲} = ۳/۲\times(\frac{۲\times۱}{۲\times۱+۲})^{۲} = ۰/۸\ kg/cm^{۲}$$

توجه: برای محاسبهٔ $\Delta\sigma_z$ در این سؤال نمی‌توانیم از روش بوسینسک استفاده کنیم، چرا که روش بوسینسک $\Delta\sigma_z$ را برای نقطه‌ای که زیر مرکز دایره است به ما می‌دهد.

۷- (۱)

فرض کنید ضخامت خاکریز موردنیاز برابر H باشد. در این‌صورت پروفیل خاک منطقه مطابق شکل زیر خواهد شد.



حال ضخامت H باید به اندازه‌ای باشد که در عمق $z = H$ از سطح خاکریز، اضافه تنش ایجاد شده از σ_{all} بیشتر نشود. پس با استفاده از روابطِ روش تقریبی ۲ به ۱ برای بارگذاری در سطح دایروی خواهیم داشت:

$$\Delta\sigma_z = q\,(\frac{D}{D+z})^{۲} \le \sigma_{all} \Rightarrow ۲\times(\frac{۵}{۵+H})^{۲} \le ۰/۵ \Rightarrow (۵+H)^{۲} \ge ۱۰۰ \Rightarrow ۵+H \ge ۱۰ \Rightarrow H \ge ۵\ m$$

یعنی اگر خاکریزی با ضخامت حداقل $۵\ m$ در سطح خاک اجرا کنیم، تنش $q = ۲\ kg/cm^{۲}$ که به سطح خاکریز وارد می‌شود تقلیل یافته و در لایهٔ باربر (خاکِ زیر خاکریز)، برابر $\Delta\sigma_z = \sigma_{all} = ۰/۵\ kg/cm^{۲}$ خواهد شد.

۸- (۱)

فرض کنیم اضافه تنش ایجاد شده در لایهٔ رسی، در محدودهٔ توزیع تنشِ هر دو بارگذاری مدنظر باشد که در این‌صورت با استفاده از روابط روش تقریبی ۲ به ۱ برای بارگذاری مستطیلی می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_{z\,\text{وسط رس}} = \Delta\sigma_{z_۱} + \Delta\sigma_{z_۲}$$

($\Delta\sigma_{z_۱}$: ناشی از پی سمت چپ؛ $\Delta\sigma_{z_۲}$: ناشی از پی سمت راست)

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)(L+z)} \Rightarrow \begin{cases} \Delta\sigma_{z_۱} = \dfrac{۳۰}{(۱+۴)^{۲}} = ۱/۲\ ton/m^{۲} \\ \Delta\sigma_{z_۲} = \dfrac{۵۰}{(۱+۴)^{۲}} = ۲\ ton/m^{۲} \end{cases} \Rightarrow \Delta\sigma_{z\,\text{وسط رس}} = ۱/۲+۲ = ۳/۲\ ton/m^{۲} = ۳۲۰۰\ kg/m^{۲}$$

۹- (۴)

روابطِ روش تقریبی ۲ به ۱ را برای بارگذاری‌های داده شده (به‌ترتیب دایره‌ای، مربعی و نقطه‌ای) در نظر بگیرید:

$$\Delta\sigma_{z_A} = q\,(\frac{D}{D+z})^{۲} = \frac{P}{(\frac{\pi D^{۲}}{۴})}\times(\frac{D}{D+z})^{۲} = \frac{۴P}{\pi(D+z)^{۲}} = \frac{۴P}{\pi(a+a)^{۲}} = \frac{P}{\pi a^{۲}}$$

$$\Delta\sigma_{z_B} = \frac{P}{(B+L)(z+L)} = \frac{P}{(a+a)(a+a)} = \frac{P}{۴a^{۲}}$$

$$\Delta\sigma_{z_C} = \frac{۴P}{\pi z^{۲}} = \frac{۴P}{\pi a^{۲}}$$

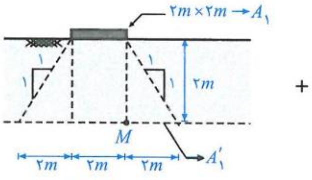
واضح است که $\frac{۴}{\pi} > \frac{۱}{\pi} > \frac{۱}{۴}$ می‌باشد، پس می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_{z_C} > \Delta\sigma_{z_A} > \Delta\sigma_{z_B}$$

۱۰- (۳)

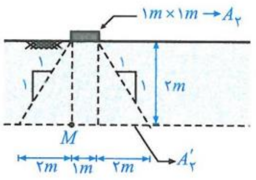
در این تست به نسبت توزیع تنش در روش تقریبی اشاره‌ای نشده است. بنابراین طبق مطلب گفته شده در متن درس، با توجه به نوع خاک زمین که درشت‌دانه است، از توزیع تنش یک به یک استفاده می‌کنیم.

توجه کنید که برای راحتی کار، هر قطعه از پی به‌صورت مجزا بررسی می‌شود و در انتها با استفاده از اصل جمع آثار قوا، اضافه تنش‌های حاصله با هم جمع می‌شوند.



شکل (۱)

+



شکل (۲)

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{z_{\text{کل}}} = \Delta\sigma_{z_۱} + \Delta\sigma_{z_۲} \\ \Delta\sigma_{z_۱} = q(\frac{A_۱}{A'_۱}) = ۱۰۰\times(\frac{۲\times۲}{۶\times۶}) = ۱۱/۱\ t/m^۲ = ۱/۱\ kg/cm^۲ \\ \Delta\sigma_{z_۲} = q(\frac{A_۲}{A'_۲}) = ۱۰۰\times(\frac{۱\times۱}{۵\times۵}) = ۴\ t/m^۲ = ۰/۴\ kg/cm^۲ \end{cases} \Rightarrow \Delta\sigma_{z_{\text{کل}}} = ۱/۱ + ۰/۴ = ۱/۵\ kg/cm^۲$$

۱۱- (۳)

به فرضیات تئوری بوسینسک در ابتدای قسمت دوم از این فصل مراجعه کنید.

۱۲- (۴)

همانطور که در متن درس دیدید، طبق تئوری بوسینسک اضافه تنش ایجاد شده ناشی از بارگذاری نقطه‌ای (متمرکز) در امتداد محور بار، از رابطهٔ $\Delta\sigma_z = \frac{۳P}{۲\pi z^۲}$ محاسبه شده و با $\frac{۱}{z^۲}$ متناسب است. حال اگر فرض کنیم که در این تست منظور طراح بررسی اضافه تنش در امتداد محور بار بوده است، در آن‌صورت در عمق ۳ متری (که z آن ۳ برابر عمق یک متری می‌باشد) $\Delta\sigma_z$، $\frac{۱}{۳^۲} = \frac{۱}{۹}$ برابر می‌شود. پس به‌طور خلاصه می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_z \propto \frac{۱}{z^۲} \Rightarrow \begin{cases} z = ۱m \Rightarrow \Delta\sigma_z = \sigma_z \\ z = ۳m \Rightarrow \Delta\sigma_z = \frac{\sigma_z}{۹} \end{cases}$$

۱۳- (۲)

از راهنمایی صورت سؤال استفاده کرده و با توجه به رابطهٔ تئوری بوسینسک برای بارگذاری نقطه‌ای (متمرکز)، می‌نویسیم:

نقطهٔ A در امتداد بار P قرار دارد و $z = R$ است. $\Rightarrow \Delta\sigma_{z_A} = \frac{۳P}{۲\pi z^۲} = \frac{۳P}{۲\pi\times۴^۲} = \frac{۳P}{۳۲\pi}$

نقطهٔ B در فاصلهٔ افقی $۴\sqrt{۳}\ m$ از محور بار است. $\Rightarrow \begin{cases} \Delta\sigma_{z_B} = \frac{۳P}{۲\pi}\frac{z^۳}{R^۵} \\ R = \sqrt{۴^۲ + (۴\sqrt{۳})^۲} = ۸\ m \end{cases} \Rightarrow \Delta\sigma_{z_B} = \frac{۳P}{۲\pi}\times\frac{۴^۳}{۸^۵} = \frac{۳P}{۱۰۲۴\pi}$

بنابراین نسبت خواسته شده برابر می‌شود با:

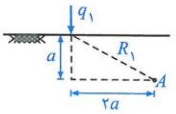
$$\frac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_B}} = \frac{\frac{۳P}{۳۲\pi}}{\frac{۳P}{۱۰۲۴\pi}} = ۳۲$$

توجه: برای محاسبهٔ $\Delta\sigma_{z_B}$ از رابطهٔ به‌دست آمده در انتهای تمرین (۷) استفاده کرده‌ایم که البته در راهنمایی صورت تست هم داده شده است.

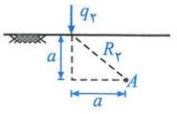
۱۴- (۲)

برای محاسبهٔ اضافه تنشِ ($\Delta\sigma_z$) ناشی از بارگذاری‌های خطی $q_۱$ و $q_۲$، از رابطهٔ مطرح شده در مطلب شمارهٔ (۱) که در نکات مربوط به این بارگذاری آماده است (راهنمایی صورت سؤال هم آن را داده است)، استفاده می‌کنیم.

$$\Delta\sigma_z = \frac{۲Qz^۳}{\pi R^۴}$$



$$\begin{cases} \Delta\sigma_{z_{A_۱}} = \dfrac{۲q_۱ z^۳}{\pi R_۱^۴} \\ R_۱ = \sqrt{(۲a)^۲ + a^۲} = \sqrt{۵}\,a \end{cases} \Rightarrow \Delta\sigma_{z_{A_۱}} = \frac{۲q_۱ \times a^۳}{\pi \times (\sqrt{۵}\,a)^۴} = \frac{۲q_۱}{۲۵\pi a}$$



$$\begin{cases} \Delta\sigma_{z_{A_۲}} = \dfrac{۲q_۲ z^۳}{\pi R_۲^۴} \\ R_۲ = \sqrt{a^۲ + a^۲} = \sqrt{۲}\,a \end{cases} \Rightarrow \Delta\sigma_{z_{A_۲}} = \frac{۲q_۲ \times a^۳}{\pi \times (\sqrt{۲}\,a)^۴} = \frac{q_۲}{۲\pi a}$$

در نهایت نسبت خواسته شده برابر می‌شود با:

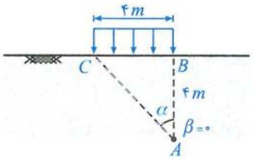
$$\frac{\Delta\sigma_{z_{A_۱}}}{\Delta\sigma_{z_{A_۲}}} = \frac{\frac{۲q_۱}{۲۵\pi a}}{\frac{q_۲}{۲\pi a}} = \frac{۴}{۲۵}\left(\frac{q_۱}{q_۲}\right) \xrightarrow{q_۱ = ۱۰ q_۲} \frac{\Delta\sigma_{z_{A_۱}}}{\Delta\sigma_{z_{A_۲}}} = \frac{۴}{۲۵} \times ۱۰ = ۱/۶$$

۱۵- (۲)

براساس رابطهٔ بوسینسک برای بارگذاری نواری، می‌نویسیم:

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi}[\alpha + \sin\alpha\cos(\alpha + ۲\beta)]$$

در شکل مقابل زاویه‌های α و β نمایش داده شده‌اند.



مثلث $\overset{\Delta}{ABC}$ قائم‌الزاویهٔ متساوی‌الساقین است. $\Rightarrow \alpha = ۴۵^\circ = \frac{\pi}{۴}(rad)$

$$\Rightarrow \Delta\sigma_z = \frac{\bar{q}}{\pi}\left[\frac{\pi}{۴} + \sin\frac{\pi}{۴}\cos\left(\frac{\pi}{۴} + ۲\times ۰\right)\right] = \frac{\bar{q}}{\pi}\left(\frac{\pi}{۴} + \frac{\sqrt{۲}}{۲} \times \frac{\sqrt{۲}}{۲}\right) = \left(۰/۲۵ + \frac{۱}{۲\pi}\right)\bar{q} = ۰/۴۱\bar{q}$$

توجه: براساس روش تقریبی ۲ به ۱، اضافه تنش قائم برابر است با: $\Delta\sigma_z = q\left(\frac{B}{B+z}\right) = \bar{q}\left(\frac{۴}{۴+۴}\right) = ۰/۵\bar{q}$

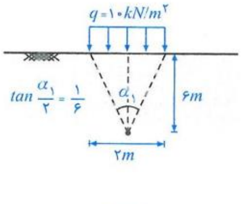
که بر این اساس گزینهٔ (۳) درست خواهد بود ولی دقت کنید که روش بوسینسک دقیق‌تر است و اگر جواب مربوط به هر دوی آنها در گزینه‌ها بود، باید جواب بوسینسک را انتخاب کنید.

۱۶- (۱)

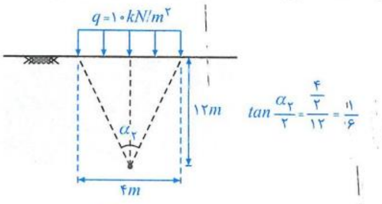
در محدودهٔ توزیع تنش در روش تقریبی ۲ به ۱، اضافه تنش ایجاد شده برای همهٔ نقاطی که در یک تراز (عمق) مشخص قرار دارند یکسان می‌باشد. در این سؤال چون به حداکثر مقدار اضافه تنش در یک تراز مشخص اشاره شده است، بنابراین روش تقریبی مورد نظر نبوده و باید از تئوری بوسینسک استفاده کنیم. طبق رابطهٔ بوسینسک اضافه تنشِ حداکثر در هر عمق درست در امتداد مرکز بارگذاری رخ داده و برای بارگذاری نواری، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

بارگذاری نواری $\Rightarrow (\Delta\sigma_z)_{max} = \frac{q}{\pi}(\alpha + \sin\alpha)$

شکل‌های زیر، بارگذاری‌های داده شده در این تست و عمق‌های مطرح شدهٔ نظیر آنها را نمایش می‌دهند.



حالت (۱)



حالت (۲)

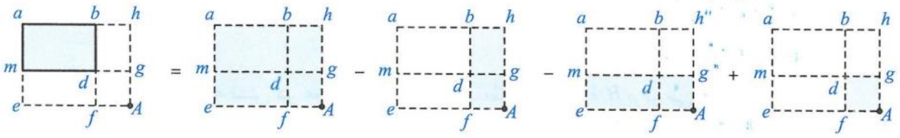
همانطورکه ملاحظه می‌کنید $\alpha_۱ = \alpha_۲$ می‌باشد (زیرا $\tan\frac{\alpha_۱}{۲} = \tan\frac{\alpha_۲}{۲}$ است) و چون q نیز ثابت است، می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_{z_۱} = \Delta\sigma_{z_۲} = ۲\ kN/m^۲$$

۱۷- (۳)

مشابه با تمرین (۱۴)، برای استفاده از رابطهٔ $\Delta\sigma_z = qI$ باید سطح بارگذاری به نحوی باشد که نقطهٔ موردنظر، در امتداد گوشه‌های قطعات مستطیلی بارگذاری واقع شود. پس می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_{z_A} = \Delta\sigma_{z_{ahAe}} - \Delta\sigma_{z_{bhAf}} - \Delta\sigma_{z_{mgAe}} + \Delta\sigma_{z_{dgAf}}$$



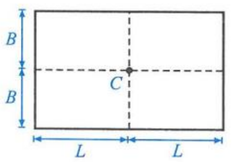
۱۸- (۱ و ۲)

برای بارگذاری روی یک سطح مستطیلی، اضافه تنش ایجاد شده از رابطهٔ $\Delta\sigma_z = q\, I_r$ به‌دست می‌آید که I_r تابعی از نسبت‌های $\frac{B}{z}$ و $\frac{L}{z}$ قطعات مستطیلی در پی است. در پی اول نقطهٔ A در زیر گوشهٔ پی واقع است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma_{z_A} = q_1 I_{r_1} \quad , \quad I_{r_1} = I\left(\frac{B}{z}, \frac{L}{z}\right)$$

پی دوم را نیز به ۴ قطعهٔ مستطیلی تقسیم می‌کنیم، به‌نحوی که نقطهٔ C در گوشهٔ این ۴ قطعه قرار بگیرد.

در این صورت با توجه به یکسان بودن این ۴ قطعه، اضافه تنش ایجاد شده در نقطهٔ C برابر می‌شود با:



$$\Delta\sigma_{z_C} = 4\, q_2 I_{r_2} \quad , \quad I_{r_2} = I\left(\frac{B}{z}, \frac{L}{z}\right)$$

(۴: C در گوشهٔ ۴ قطعهٔ مستطیلی قرار دارد.)

از طرفی چون نسبت‌های $\frac{B}{z}$ و $\frac{L}{z}$ در پی اول و تمامی قطعات پی دوم مشابه است، $I_{r_1} = I_{r_2} = I\left(\frac{B}{z}, \frac{L}{z}\right)$ بوده و می‌توان نوشت:

$$\frac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_C}} = \frac{q_1 I_{r_1}}{4 q_2 I_{r_2}} = \frac{q_1}{4 q_2}$$

- اگر منظور طراح از بار یکسان، نیروی P یکسان $(P_1 = P_2)$ باشد، خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_C}} = \frac{q_1}{4 q_2} = \frac{\left(\frac{P_1}{A_1}\right)}{4\left(\frac{P_2}{A_2}\right)} = \frac{A_2}{4 A_1} = \frac{2B \times 2L}{4 \times B \times L} = 1$$

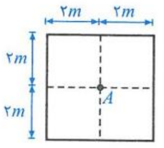
- اگر منظور طراح از بار یکسان، شدت بار q یکسان $(q_1 = q_2)$ باشد، خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_C}} = \frac{q_1}{4 q_2} = 0/25$$

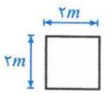
لازم به ذکر است در کلید این آزمون که توسط سازمان سنجش ارائه شد، هر دو گزینهٔ (۱) و (۲) به‌عنوان پاسخ صحیح پذیرفته گردید.

۱۹- (۲)

در پی اول، قطعات مستطیلی را به شکل زیر ایجاد می‌کنیم، به نحوی که نقطهٔ A در گوشهٔ هر چهار قطعه بیافتد.



$$\Rightarrow \Delta\sigma_{z_A} = 4 \times \Delta\sigma_z \left(\text{2m} \times \text{2m} \right) = 4 \times q_1 I_{r_1}$$

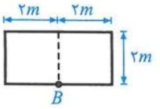


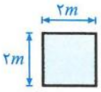
توجه کنید که در عمق $z = 2m$ از سطح خاک، I_{r_1} برای پی اول بر حسب نسبت‌های زیر به‌دست می‌آید:

$$I_{r_1} = I(m_1, n_1) = I\left(\frac{2}{2}, \frac{2}{2}\right) = I(1, 1)$$

(m_1 و n_1: برای قطعات مستطیلی تقسیم شده در پی اول)

در پی دوم نیز، قطعات مستطیلی را به شکل زیر در نظر می‌گیریم تا نقطهٔ B نیز در گوشهٔ تمامی این قطعات واقع شود.



$\Rightarrow \ \Delta\sigma_{z_B} = ۲ \times \Delta\sigma_z$ () $= ۲ q_۲ I_{r_۲}$

در این حالت $I_{r_۲}$ برای عمق $z = ۲m$ در پی دوم، بر حسب نسبت‌های زیر به‌دست می‌آید:

$$I_{r_۲} = I(m_۲, n_۲) = I(\frac{۲}{۲}, \frac{۲}{۲}) = I(۱, ۱) = I_{r_۱}$$

($m_۲$ و $n_۲$: برای قطعات مستطیلی تقسیم شده در پی دوم)

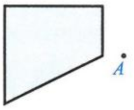
پس در نهایت نسبت اضافه تنش در عمق $z = ۲m$ برای نقطهٔ A به نقطهٔ B برابر می‌شود با:

$$\begin{cases} \dfrac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_B}} = \dfrac{۴ q_۱ I_۱}{۲ q_۲ I_۲} \\ q_۱ = \dfrac{P_۱}{A_۱} = \dfrac{۲۰۰}{۴ \times ۴} = ۱۲/۵\, t/m^۲ \\ q_۲ = \dfrac{P_۲}{A_۲} = \dfrac{۱۰۰}{۴ \times ۲} = ۱۲/۵\, t/m^۲ \end{cases} \Rightarrow \dfrac{\Delta\sigma_{z_A}}{\Delta\sigma_{z_B}} = \dfrac{۴ \times ۱۲/۵ \times I_۱}{۲ \times ۱۲/۵ \times I_۲} = ۲$$

($I_۱ = I_۲$)

۲۰- (۳)

باتوجه به مطالب گفته شده در متن درس، واضح است که گزینه‌های (۱)، (۲) و (۴) صحیح می‌باشند ولی گزینه (۳) نادرست است، زیرا برای نقطه‌ای که می‌خواهیم اضافه تنش قائم آن را محاسبه کنیم، محدودیتی وجود ندارد. این نقطه می‌تواند در هر مکانی از جمله خارج از سطح بارگذاری هم قرار داشته باشد. به‌عنوان مثال می‌توان به محاسبهٔ اضافه تنش قائم نقطهٔ A در سطح بارگذاریِ شکل زیر اشاره کرد که با روش منحنی نیومارک انجام می‌شود.



فصل ۷: نشست خاک

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

این فصل را با طرح یک سؤال شروع می‌کنیم؛ به‌نظر شما اگر یک سازه (مثلاً یک ساختمان) را بر روی زمین بسازیم، چه اتفاقی می‌افتد؟ بله احتمالاً درست حدس زده‌اید، با احداث سازه روی زمین، تنش‌های جدیدی به خاک اعمال می‌شود که در نتیجهٔ این تنش‌ها، خاک نشست می‌کند. نشست خاک همواره به عنوان یکی از نگرانی‌های اصلی مهندسان عمران مطرح بوده است، بنابراین به‌عنوان یک مهندس لازم است تا قبل از احداث سازه، انواع نشست‌های ممکن برای خاک را مشخص کرده و مقدار آنها را محاسبه کنیم. از سوی دیگر پس از محاسبهٔ مقدار نشست، باید کنترل شود که مقدار آن از نشست مجاز خاک بیشتر نشود.

حال احتمالاً از خود می‌پرسید که انواع نشست‌هایی که در یک خاک می‌تواند رخ دهد چیست؟

در جواب باید گفت که نشست در خاک‌ها به دو دستهٔ کلی تقسیم می‌شود که در ادامه آن را در نمودار درختی زیر به شما معرفی می‌کنیم:

- انواع نشست
  - نشست کوتاه مدت
    - الاستیک: این نوع نشست برگشت‌پذیر بوده و به نشست آنی نیز معروف است. نشست آنی در کلیهٔ خاک‌ها (به جز رس اشباع) مورد توجه می‌باشد.
    - غیرالاستیک: این نوع نشست برگشت‌ناپذیر بوده و می‌تواند به‌علت خروج هوا از خاک (تراکم) و یا خروج سریع آب از خاک درشت‌دانه اشباع رخ دهد.
  - نشست دراز مدت
    - تحکیم اولیه: این نوع نشست در واقع نشست دراز مدت خاک رس اشباع (و یا نزدیک به اشباع) است که در طی آن با گذشت زمان آب از خاک خارج می‌گردد.
    - تحکیم ثانویه: این نوع از نشست ناشی از تغییر شکل پلاستیک خاک رس اشباع است و جالب است که بدانید بعد از تحکیم اولیه نیز همچنان ادامه دارد.

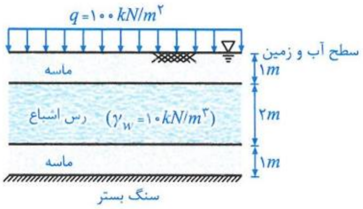
در این فصل عمدهٔ بحث خود را بر روی نشست دراز مدت خاک رس (تحکیم) متمرکز می‌کنیم و بحث مفصل در مورد نشست کوتاه مدت خاک را در کتاب پی‌سازی سری عمران (فصل دوم) دنبال خواهیم کرد. مطالب ارائه شده در این فصل در قالب قسمت‌های زیر می‌باشد:

نشست خاک
- قسمت اول: آشنایی با مفاهیم تحکیم و تورم در خاک رس
- قسمت دوم: آشنایی با آزمایش تحکیم یک‌بعدی و نکات مربوط به آن
- قسمت سوم: محاسبهٔ نشست تحکیم اولیه
- قسمت چهارم: آشنایی با مفهوم درجهٔ تحکیم
- قسمت پنجم: محاسبهٔ نشست در حین تحکیم و آشنایی با پارامترهای سرعت تحکیم
- قسمت ششم: مباحث تکمیلی نشست خاک

در این قسمت، ابتدا با یک مثال ساده پدیدهٔ تحکیم را معرفی می‌کنیم و در ادامه شما را با عواملی که باعث ایجاد تحکیم و تورم در خاک رسی می‌شوند آشنا خواهیم کرد. در انتهای این قسمت نیز رفتار انواع خاک رس در پدیدهٔ تحکیم را بررسی می‌کنیم.

A-۱- آشنایی با مفهوم تحکیم اولیه

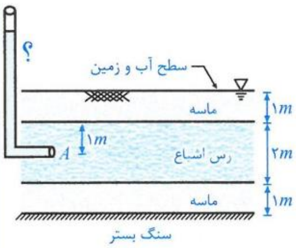
پروفیل خاک شکل زیر را در نظر بگیرید. در این پروفیل یک لایهٔ رس اشباع از پایین و بالا بین دو لایه خاک ماسه‌ای محدود شده است. فرض کنید یک بار گسترده به شدت $q = 100\ kN/m^2$ در سطح وسیعی* بر روی این پروفیل خاک اعمال شود. در این شرایط در اثر اعمال بار q، آب به تدریج از طریق لایه‌های ماسه‌ای از خاک رس اشباع خارج شده و خاک نشست می‌کند که به این پدیده **نشست تحکیم اولیه** و یا به اختصار تحکیم می‌گوییم.



در ادامه برای درک بهتر شما عزیزان، با طرح چند سؤال از پروفیل فوق، پدیدهٔ تحکیم را دقیق‌تر بررسی می‌کنیم:

بررسی چند سوال

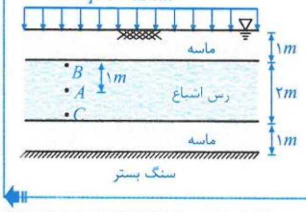
سؤال ۱: در شکل زیر، سطح آبِ پیزومتر در نقطهٔ A در کدام تراز قرار دارد و ارتفاع ستون آب در آن چند متر است؟



پاسخ: قبل از اعمال بارگذاری، سطح آب در پیزومتر هم‌تراز با سطح سفرهٔ آب زیرزمینی بوده و ارتفاع آب در پیزومتر برابر است با:

$$h_{P_A} = \frac{u_A}{\gamma_w} = 2\,m$$

سؤال ۲: بلافاصله بعد از اعمال بار $q = 100\ kN/m^2$، اضافه تنش مؤثر در نقاط A و B و C چقدر است؟



* از فصل قبل می‌دانیم که وقتی یک بار گسترده به شدت q، در سطح وسیع بر روی خاک اعمال می‌شود، اضافه تنش آن در اعماق خاک برابر همان q است.

قسمت اول: آشنایی با مفاهیم تحکیم و تورم در خاک رس

زیر شاخه‌های قسمت اول

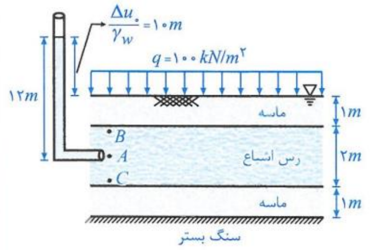
A-۱- آشنایی با مفهوم تحکیم اولیه
A-۲- آشنایی با عواملی که می‌توانند باعث تحکیم در خاک رس شوند
A-۳- تورم و عوامل ایجاد آن در خاک رس
A-۴- آشنایی با اصطلاح خاک رس عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته

پاسخ: همانطور که در فصل پنجم خواندیم، بلافاصله بعد از اعمال بار q، تنش مؤثر در داخل رس تغییر نمی‌کند. به همین علت اضافه تنش مؤثر $(\Delta\sigma')$ در سه نقطهٔ A، B و C، بلافاصله بعد از اعمال بار q برابر صفر است.

تذکر: به‌عنوان یک توضیح بیشتر برای پاسخ فوق می‌توان گفت، چون خاک رس نفوذپذیری پایینی دارد، بنابراین بلافاصله پس از اعمال بار q، امکان خروج آب از آن وجود ندارد. از طرفی آب نیز غیرقابل تراکم بوده و به‌همین دلیل تودهٔ رسی نشست نمی‌کند. در این شرایط دانه‌های جامد نمی‌توانند به هم نزدیک‌تر شوند و در نتیجه تنش بین آنها یعنی تنش مؤثر تغییر نخواهد کرد.

سؤال ۳: بلافاصله بعد از اعمال بار $q = 100\ kN/m^2$، فشار آب حفره‌ای در نقاط A و B و C چگونه تغییر می‌کند؟ در این لحظه ارتفاع ستون آب در پیزومتر در نقطهٔ A چقدر است؟

پاسخ: همانطورکه در سؤال قبل دیدید، بلافاصله پس از اعمال بار q دانه‌های جامد نقشی در تحمل این بار ندارند، یعنی در ابتدا همهٔ بار $q = 100\ kN/m^2$ به آب رسیده و فشار آب حفره‌ای در نقاط A، B و C به اندازهٔ $100\ kN/m^2$ افزایش می‌یابد. در این شرایط ارتفاع ستون آب در پیزومترِ نقطهٔ A برابر است با:



$$h_{P_A} = \underbrace{2}_{\text{مقدار اولیه}} + \underbrace{\frac{\Delta u_0}{\gamma_w}}_{\text{مقدار اضافه شده}} = 2 + \frac{100}{10} = 12\ m$$

سؤال ۴: مدت‌ها پس از اعمال بار، فشار آب حفره‌ای در نقاط A، B و C چه تغییری می‌کند؟

پاسخ: با گذشت زمان و خروج آب از رس اشباع، خاک رس نشست کرده و دانه‌های جامد به هم نزدیک‌تر می‌شوند و همانطورکه از فصل پنجم نیز به یاد دارید نتیجهٔ این اتفاق، افزایش تنش مؤثر خاک و کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای (یا کاهش فشار آب حفره‌ای) است. این روندِ افزایش تنش مؤثر و کاهش فشار آب حفره‌ای آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا مدت‌ها پس از اعمال بار، اضافه فشار آب حفره‌ای در نقاط A، B و C صفر می‌شود و فشار آب حفره‌ای این نقاط مجدداً برابر مقدار اولیه آنها در قبل از بارگذاری می‌گردد. این موضوع یعنی اینکه تنش اعمال شده به خاک پس از گذشت زمان زیاد، به تنش مؤثر تبدیل می‌شود.

تذکر مهم: در مکانیک خاک به صفر شدن اضافه فشار آب حفره‌ای (که در اثر بارگذاری ایجاد شده است) **زهکشی** می‌گوییم و لایه‌های نفوذپذیر ماسه یا شن نیز که به علت نفوذپذیری بالا، امکان خارج شدن آب از لایه رسی و زهکشی آن را فراهم می‌کنند، **مرزهای زهکش** نامیده می‌شوند.

سؤال ۵: به‌نظر شما فشار آب حفره‌ای در کدام‌یک از نقاط A، B و C زودتر به مقدار اولیهٔ خود (در قبل از بارگذاری) برمی‌گردد؟

پاسخ: از بین نقاط مختلف لایهٔ رسی، آنهایی که مثل B و C به ماسه (مرز زهکش) نزدیکترند، زودتر اضافه فشار آب حفره‌ای خود را از دست داده و فشار آب حفره‌ای آنها سریع‌تر به مقدار اولیه‌شان برمی‌گردد. این در حالی است که نقاط دورتر از ماسه مثل نقطهٔ A، این کار را دیرتر انجام می‌دهند.

سؤال ۶: اعمال بار q بر سطح خاک باعث ایجاد چه فرآیندی در رس اشباع می‌شود؟

پاسخ: اعمال بار q در سطح خاک باعث می‌شود تا تنش مؤثر در خاک رسی به‌تدریج زیادتر شود، زیرا با خروج آب از خاک رس اشباع، خاک نشست می‌کند و دانه‌های جامد به هم نزدیکتر شده و تنش بین آنها افزایش می‌یابد. در این شرایط خاک رس محکم شده و اصطلاحاً تحکیم می‌یابد.

جمع‌بندی: از سؤالاتی که بررسی کردیم، می‌توان نتایج زیر را برداشت کرد:

① در کوتاه‌مدت و بلافاصله بعد از اعمال بار q، همهٔ بار وارده به آب می‌رسد و فشار آب حفره‌ای به اندازهٔ q افزایش می‌یابد. در این شرایط تنش مؤثر تغییر نکرده و برابر همان مقدار اولیهٔ خود در قبل از بارگذاری است.

② مدتی پس از بارگذاری، بار وارده کم‌کم به دانه‌های جامد منتقل می‌شود و ضمن افزایش تنش مؤثر، به همان میزان از فشار آب حفره‌ای کاسته می‌شود. در این شرایط با خروج آب از خاک مواجه می‌شویم که باعث کاهش حجم و در نتیجه نشست خاک خواهد شد.

③ در دراز مدت یعنی مدت‌ها (مدت مدیدی) پس از بارگذاری، همهٔ بار به دانه‌های جامد می‌رسد و تنش مؤثر به اندازهٔ q افزایش می‌یابد. در این زمان تمام اضافه فشار آب حفره‌ای از روی آب برداشته می‌شود و فشار آب حفره‌ای برابر همان مقدار اولیهٔ خود در قبل از بارگذاری خواهد شد. در چنین شرایطی خروج آب از خاک متوقف شده و نشست خاک تقریباً به مقدار نهایی خود می‌رسد.

④ همهٔ نقاط لایهٔ رسی زهکشی یکسانی ندارند، به این معنی که نقاط نزدیک‌تر به مرزهای زهکش زودتر و نقاط دورتر از این مرزها، دیرتر زهکشی شده و اضافه فشار آب حفره‌ای خود را صفر می‌کنند.

⑤ در تحکیم چون با یک فرآیند زمان‌بر مواجه هستیم، بنابراین زمان برای ما یک عامل مهم و تعیین‌کننده است.

در ادامه برای درک بهتر مطالب گفته شده، به تمرین‌های زیر توجه کنید.

تمرین ۱: اگر بر روی یک تودهٔ اشباع خاک ریزدانه مثل رس تنش جدیدی وارد شود:

الف) بلافاصله بعد از اعمال تنش .... (سراسری - ۸۹)

۱) فشار آب حفره‌ای کم و تنش مؤثر هم کم می‌شود. ۲) فشار آب حفره‌ای زیاد و تنش مؤثر کم می‌شود.

۳) فشار آب حفره‌ای زیاد و تنش مؤثر تغییر نمی‌کند. ۴) فشار آب حفره‌ای کم و تنش مؤثر زیاد می‌شود.

ب) مدت طولانی بعد از بارگذاری، فشار آب حفره‌ای .... مقدار اولیهٔ قبل از بارگذاری است و تنش مؤثر .... می‌یابد.

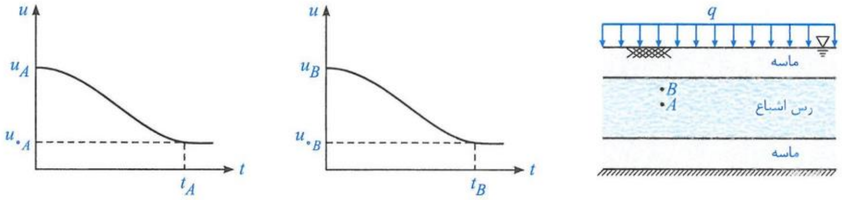
۱) کمتر از - افزایش ۲) بیشتر از - افزایش ۳) برابر - کاهش ۴) برابر - افزایش

● پاسخ در پاسخ به قسمت‌های (الف) و (ب) می‌توان گفت:

الف) بلافاصله بعد از بارگذاری بر روی رس اشباع، فشار آب حفره‌ای به اندازهٔ بار وارده زیاد می‌شود و تنش مؤثر ثابت مانده و تغییر نمی‌کند، پس گزینهٔ (۳) صحیح است.

ب) مدت طولانی بعد از بارگذاری، اضافه فشار آب حفره‌ای برابر صفر شده و فشار آب حفره‌ای برابر مقدار اولیهٔ خود در قبل از بارگذاری می‌شود. در این شرایط تنش مؤثر به اندازهٔ بار وارده افزایش می‌یابد و گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۲: در شکل زیر یک لایه خاک رس اشباع با دو مرز زهکش در بالا و پایین آن نشان داده شده است. اگر بر سطح خاک بار آنی q وارد شده و نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای از ابتدا تا انتهای تحکیم برای دو نقطهٔ A و B مطابق شکل باشد، در آن‌صورت مقادیر t_A و t_B را مقایسه کنید.



● پاسخ نقطهٔ A نسبت به نقطهٔ B، در فاصلهٔ دورتری از مرزهای زهکش (ماسه) قرار دارد و به همین دلیل دیرتر اضافه فشار آب حفره‌ای خود را صفر می‌کند و به مقدار اولیه برمی‌گردد، پس $t_A > t_B$ است.

● **دقت:** در ابتدای بارگذاری، فشار آب حفره‌ای در هر دو نقطهٔ A و B به اندازهٔ q افزایش می‌یابد ($\Delta u_A = \Delta u_B$: شروع بارگذاری). به نظر شما در مقایسه u_A و u_B در این لحظه $(t = \circ)$ چه می‌توان گفت؟

A-۲- آشنایی با عواملی که می‌توانند باعث تحکیم در خاک رس شوند

در بخش قبل دیدیم که به هنگام تحکیم، تنش مؤثر در خاک رس اشباع افزایش می‌یابد. ما به این موضوع عمومیت داده و به عنوان یک اصل اساسی می‌گوییم که هرگاه **با رخ دادن یک اتفاق، تنش مؤثر در خاک رسِ اشباع افزایش یابد، این اتفاق باعث نشست تحکیم در لایه رسی می‌گردد.**

معمولاً رخ دادن یکی از سه اتفاق زیر باعث تحکیم رس می‌شود که به‌ترتیب اهمیت عبارتند از:

۱ اعمال بار روی سطح خاک

بارگذاری روی سطح خاک می‌تواند به‌صورت گسترده و در یک سطح وسیع باشد و یا از طریق یک پی با ابعاد مشخص و در یک سطح محدود انجام شود. در هر صورت این بارگذاری‌ها در خاک اضافه تنش تولید می‌کنند (که البته نحوهٔ محاسبهٔ آنها را در فصل قبل یاد گرفتیم) و این اضافه تنش در نهایت به تنش مؤثر تبدیل شده و درصورت وجود لایهٔ رس اشباع باعث نشست تحکیم می‌شود.

۲ پایین آمدن سطح سفرهٔ آب زیرزمینی

همانطور که در فصل پنجم کتاب خواندیم، اگر سطح سفرهٔ آب زیرزمینی در یک محل در اثر عواملی چون خشکسالی منطقه یا پمپاژ آب پایین بیاید، در آن‌صورت تنش مؤثر خاک در لایه‌های پایینی افزایش می‌یابد. حال اگر در پروفیل منطقه، خاک رس اشباع داشته باشیم، این افزایش تنش مؤثر باعث ایجاد نشست تحکیم در رس می‌گردد.

۳ صعود مویینگی

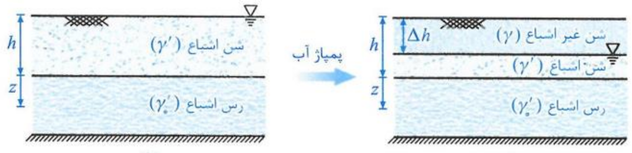
با توجه به مطالب فصل پنجم کتاب، صعود مویینگی نیز مانند دو عامل قبلی باعث افزایش تنش مؤثر در خاک می‌شود. حال اگر در پروفیل موردنظر خاک رس اشباع داشته باشیم، این افزایش تنش مؤثر باعث نشست تحکیم رس می‌گردد.

در ادامه با حل چند تمرین، مفاهیم گفته شده را بررسی می‌کنیم:

تمرین ۳: پروفیل شکل زیر را در نظر بگیرید که در آن لایهٔ شنی روی رس قرار گرفته و در ابتدا سطح آب بر سطح زمین منطبق است. اگر به علت پمپاژ آب، سطح سفرهٔ آب زیرزمینی به اندازهٔ Δh در لایهٔ شنی پایین برود، در آن‌صورت:

الف) بلافاصله بعد از پایین آمدن سطح آب، تنش مؤثر در عمق z از رس اشباع چقدر است؟

ب) مدت‌ها بعد از پایین آمدن سطح آب، تنش مؤثر در عمق z چقدر است و نسبت به حالت اولیه چقدر تغییر می‌کند؟



(۱) (۲)

● حل: با توجه به مطالبی که در فصل پنجم خواندیم (تمرین ۲ و نتایج آن) می‌توان گفت:

الف) بلافاصله بعد از پایین آمدن سطح آب، تنش مؤثر در لایهٔ رسی ثابت مانده و تغییر نمی‌کند. به‌عبارت دیگر ما در ابتدای تحکیم قرار داریم و مقدار تنش مؤثر در این لحظه برابر است با:

$$\sigma'_1 = \gamma' \times h + \gamma'_c \times z$$

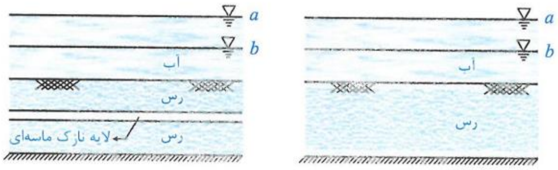
ب) مدت مدیدی بعد از افت سطح آب، تنش مؤثر در لایهٔ رسی افزایش می‌یابد که مقدار این افزایش برابر است با:

$$\Delta\sigma' = (\gamma - \gamma')\Delta h$$

پس تنش مؤثر نهایی در این حالت که در واقع انتهای فرآیند تحکیم است، برابر می‌شود با:

$$\sigma'_2 = \gamma' h + \gamma'_c z + (\gamma - \gamma')\Delta h$$

تمرین ۴: در شکل زیر، تراز آب از سطح a به b افت کرده و همواره در این سطح باقی مانده به‌طوری‌که لایهٔ رس پیوسته در زیر آب است. در مورد نشست تحکیمی در پروفیل (۱) و (۲) چه اظهارنظری می‌توان کرد؟ (سراسری - ۸۱)



پروفیل (۲) پروفیل (۱)

● حل: چون پایین آمدن سطح آب در بیرون از خاک اتفاق افتاده است، بنابراین در این حالت تنش مؤثر در خاک رس تغییر نکرده و این موضوع یعنی در هیچ یک از پروفیل‌های (۱) و (۲) نشست تحکیمی رخ نمی‌دهد.

تمرین ۵: در شکل روبرو چنانچه لایهٔ ماسه‌ای به‌طور کامل اشباع شود، در آن‌صورت ....

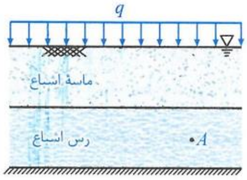
۱) حتماً در لایهٔ رسی تحکیم رخ می‌دهد.
۲) هرگز در لایهٔ رسی تحکیم رخ نمی‌دهد.
۳) ممکن است در لایهٔ رسی تحکیم رخ دهد.
۴) وقوع تحکیم در لایهٔ رسی بستگی به مشخصات رس دارد.

حل: اگر اشباع شدن ماسه در اثر بارندگی و بالا آمدن سطح سفرهٔ آب زیرزمینی باشد، تنش مؤثر در خاک رس کاهش یافته و تحکیم رخ نمی‌دهد ولی اگر اشباع شدن ماسه به علت صعود مویینگی آب باشد، در آن‌صورت تنش مؤثر در خاک رس افزایش یافته و خاک رس تحکیم می‌یابد. پس بسته به نحوهٔ اشباع شدن لایهٔ ماسه‌ای ممکن است تحکیم رخ دهد یا رخ ندهد، از این‌رو گزینهٔ (۳) پاسخ صحیح این تست است.

A-۳- تورم و عوامل ایجاد آن در خاک رس

در بخش قبل دیدیم که اگر تنش مؤثر در خاک رس افزایش یابد، در نهایت منجر به نشست در خاک رس می‌گردد. اما موضوع جالب آن است که اگر تنش مؤثر در خاک رس کاهش یابد، عکس عمل تحکیم اتفاق می‌افتد، یعنی خاک رس کمی افزایش حجم داده و با جذب مقداری آب متورم می‌شود. نکته قابل توجه در مورد این پدیده که به آن **تورم** می‌گوییم آن است که این پدیده مکانیزمی بسیار شبیه به مکانیزم تحکیم دارد. توضیح بیشتر را در تمرین زیر ببینید.

تمرین ۶: در شکل مقابل چنانچه بار گستردهٔ q که در سطح وسیعی اجرا شده است، برداشته شود، در آن‌صورت:



الف) در سطح زمین برآمدگی مشاهده می‌شود یا نشست؟

ب) در مورد نحوهٔ تغییرات تنش مؤثر و فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A در کوتاه مدت و بلند مدت چگونه می‌توان اظهار نظر کرد؟

حل:

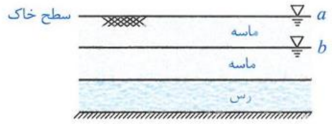
الف) چون با برداشتن q، در نهایت تنش مؤثر در خاک رس اشباع کاهش می‌یابد، بنابراین پدیدهٔ تورم رس اتفاق می‌افتد و با افزایش حجم خاک رسی مواجه می‌شویم. این موضوع یعنی سطح زمین در نهایت کمی برآمده خواهد شد.

ب) بلافاصله بعد از باربرداری، تنش مؤثر ثابت مانده و فشار آب حفره‌ای به اندازهٔ بار برداشته شده (q) کاهش می‌یابد، یعنی در این لحظه $\Delta u=-q$ و $\Delta\sigma'=0$ است. از سوی دیگر مدت طولانی بعد از باربرداری، تنش مؤثر به اندازه بار برداشته شده (q) کاهش می‌یابد و فشار آب حفره‌ای (با صفر شدن اضافه فشار آب حفره‌ای منفی)، برابر مقدار اولیهٔ خود در قبل از باربرداری خواهد شد. پس در این لحظه $\Delta u=0$ و $\Delta\sigma'=-q$ است.

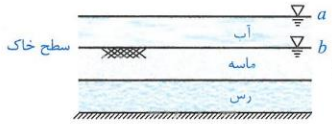
تذکر: به‌طور کلی اگر عوامل ایجادکنندهٔ تحکیم برطرف شوند، خاک رس متورم می‌شود. به‌عبارت دیگر اگر بارِ گذاشته شده، برداشته شود (باربرداری) یا سفرهٔ آب زیرزمینی در اثر عاملی مثل بارندگی، در داخل خاک بالا بیاید و یا صعود مویینگی افت کرده و از بین برود، در آن‌صورت با کاهش تنش مؤثر در خاک رس و پدیدهٔ تورم مواجه خواهیم شد.

تمرین ۷: در کدام‌یک از شکل‌های زیر، تغییر سطح آب از a به b باعث برآمدگی در سطح خاک می‌گردد؟

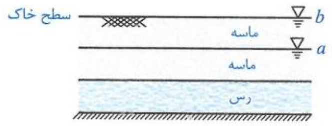
۱)



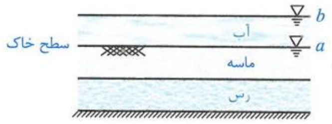
۲)



۳)



۴)



حل: در ابتدا توجه شود که تغییرات تراز آب در گزینه‌های (۲) و (۴) در بالای سطح خاک است و این موضوع هیچگونه افزایش یا کاهشی در تنش مؤثر خاک رس ایجاد نمی‌کند، پس نه تحکیم داریم و نه تورم. از طرفی در گزینه‌های (۱) و (۳) به‌ترتیب با نزول و صعود سطح آب در داخل خاک مواجهیم که اولی منجر به افزایش و دومی باعث کاهش تنش مؤثر در خاک رس می‌گردد. بنابراین در خاک رسِ گزینهٔ (۱) با نشست تحکیم و در خاک رسِ گزینه (۳) با تورم و برآمدگی در سطح خاک مواجه هستیم و گزینهٔ (۳) صحیح است.

A-۴- آشنایی با اصطلاح خاک رس عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته

یک خاک رس با توجه به سابقه و تاریخچهٔ بارگذاری‌اش در یکی از دو دستهٔ زیر قرار می‌گیرد:

۱) **رس پیش تحکیم یافته** یا به زبان ساده‌تر خاک رس با تجربه ($OC = Over\ Consolidated$)

۲) **رس عادی تحکیم یافته** یا به زبان ساده‌تر خاک رس بی‌تجربه ($NC = Normal\ Consolidated$)

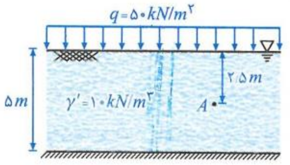
در ادامه تلاش می‌کنیم با ارائه شکل‌های متنوع و مثال‌های عددی، این مفاهیم را به شما یاد دهیم ولی قبل از آن می‌خواهیم پارامتری به نام **نسبت پیش‌تحکیمی** یا OCR را که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود، به شما معرفی کنیم:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ}$$

در رابطهٔ بالا σ'_c **تنش پیش تحکیمی** نام دارد و معرف بیشترین تنش مؤثری است که خاک رس در عمق موردنظر (در پروفیل‌های رسی این عمق معمولاً وسط رس است) در طول عمر خود تجربه کرده است و $\sigma'_\circ$ نیز تنش مؤثر موجود (در حال حاضر) در این عمق است.

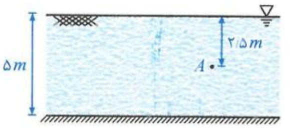
۱- مفهوم خاک رس پیش تحکیم یافته

مطابق شکل زیر پروفیلی از یک خاک رس اشباع به ضخامت ۵ متر را در نظر بگیرید که تحت بار گستردهٔ $q = ۵۰\ kN/m^۲$ در یک سطح وسیع قرار گرفته و مدت طولانی نیز از این بارگذاری گذشته است. در این شرایط تنش مؤثر در وسط رس (نقطهٔ A) برابر است با:



$$\sigma'_A = \gamma' z + q = ۱۰ \times ۲/۵ + ۵۰ = ۷۵\ kN/m^۲$$

حال اگر بار q را از روی سطح خاک برداریم، رس متورم می‌شود و پس از مدتی طولانی، تنش مؤثر در نقطهٔ A برابر خواهد بود با:



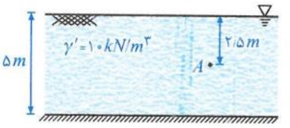
$$\sigma'_A = \gamma' z = ۱۰ \times ۲/۵ = ۲۵\ kN/m^۲$$

در این شرایط با خاک رسی مواجهیم که در گذشته تنش‌های مؤثر بزرگتری را تجربه کرده است (رس با تجربه) و به آن رس پیش تحکیم یافته (OC) می‌گوییم. برای خاک رس پیش‌تحکیم یافته $OCR > ۱$ است، به‌طوری‌که در مثال مورد نظر ما این مقدار برابر است با:

$$(OCR)_A = \frac{\sigma'_{c_A}}{\sigma'_{\circ_A}} = \frac{۷۵}{۲۵} = ۳$$

۲- مفهوم رس عادی تحکیم یافته

پروفیل شکل مقابل را در نظر گرفته و تنش مؤثر در وسط آن را (نقطهٔ A) می‌یابیم:



$$\sigma'_\circ = \gamma' z = ۱۰ \times ۲/۵ = ۲۵\ kN/m^۲$$

فرض کنید خاک رس نشان داده شده در این پروفیل قبلاً تحت هیچ بار اضافه‌ای نبوده است و بی‌تجربه می‌باشد. پس این خاک رس تنها تحت اثر وزن خود و به‌صورت عادی (بدون بارگذاری) در گذر زمان تحکیم یافته است، به‌همین علت به آن رس عادی تحکیم یافته (NC) می‌گوییم. در این شرایط OCR در نقطهٔ A برابر است با:

$$(OCR)_A = \frac{\sigma'_{c_A}}{\sigma'_{\circ_A}} = \frac{۲۵}{۲۵} = ۱$$

نتیجه آنکه در خاک رس عادی تحکیم یافته همواره $OCR = ۱$ است.*

---

* برای خاک رسی که تحت اثر وزن خود در حال تحکیم است، $OCR < ۱$ می‌باشد. با توجه به کم اهمیت بودن این موضوع در آزمون کارشناسی ارشد، بحث بیشتر در مورد آن را به بخش **افزایش مهارت و تسلط بیشتر** در انتهای این فصل موکول می‌کنیم.

در ادامه برای درک بهتر شما از مفاهیم گفته شده، به حل و بررسی چند تمرین به شرح زیر می‌پردازیم:

تمرین ۸: درستی یا نادرستی هر یک از عبارت‌های زیر را بررسی کنید.

الف) هرگاه خاک رس دچار تورم شود می‌توان آن را پیش تحکیم یافته دانست.

ب) پایین رفتن سطح سفرهٔ آب زیرزمینی در پروفیل خاک باعث می‌شود تا خاک رس قرار گرفته در پایین سفرهٔ آب، پیش تحکیم یافته به حساب آید.

ج) افت مویینگی در خاک بالای رس باعث می‌شود تا با یک خاک رس OC مواجه شویم.

پاسخ: بیایید قبل از بررسی عبارت‌های فوق، چند مفهوم مهم در ارتباط با این سؤال را یاد بگیریم:

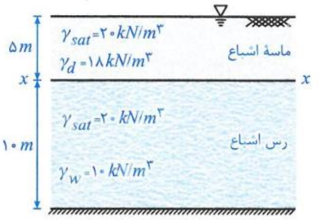
۱- اگر خاک رس دچار تورم شود به این معنی است که تنش مؤثر آن کم شده و این یعنی قبلاً تنش‌های بزرگتری را تجربه کرده و اکنون با تجربه یا پیش تحکیم یافته است.

۲- هر عاملی که باعث تورم خاک رس شود، آن را پیش تحکیم یافته می‌کند.

۳- عواملی مانند صعود سطح سفرهٔ آب زیرزمینی، افت تراز مویینگی و باربرداری، باعث تورم خاک رس و در نتیجه پیش تحکیم یافتگی آن می‌شوند.

حال با دانستن مفاهیم بالا می‌توان گفت که عبارت‌های (الف) و (ج) درست بوده و عبارت (ب) نادرست است.

تمرین ۹: در پروفیل شکل زیر، سطح سفرهٔ آب زیرزمینی قبلاً در تراز $(x-x)$ قرار داشته است (خاک ماسه‌ای کاملاً خشک بوده است) ولی در وضعیت فعلی، سطح آب بالا آمده و بر سطح زمین منطبق شده است. نسبت پیش‌تحکیمی نمونه‌ای که در عمق ۱۰ متری از سطح خاک قرار دارد، در وضعیت موجود (مدت مدیدی بعد از بالاآمدن سطح آب) چقدر است؟



پاسخ: در حالت فعلی (تراز آب در سطح خاک باشد)، تنش مؤثر در عمق ۱۰ متری از سطح زمین به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\sigma'_\circ = ۱۰ \times ۵ + ۱۰ \times ۵ = ۱۰۰\ kN/m^۲$$

تنش مؤثر در این عمق وقتی سطح آب در تراز $(x-x)$ قرار داشته نیز برابر است با:

$$\sigma'_c = ۱۸ \times ۵ + ۱۰ \times ۵ = ۱۴۰\ kN/m^۲$$

و در نهایت OCR در عمق ۱۰ متری از سطح خاک برابر می‌شود با:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ} = \frac{۱۴۰}{۱۰۰} = ۱/۴$$

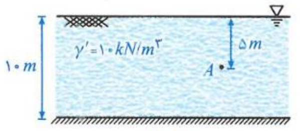
یک نتیجه جالب

اگر مقدار OCR را در یک عمق دیگر مثلاً در عمق ۱۵ متری از سطح خاک (پایین‌ترین نقطه از لایهٔ رسی) محاسبه کنیم، در آن‌صورت خواهیم داشت:

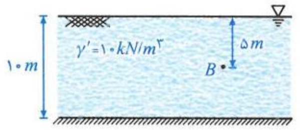
$$\begin{cases} \sigma'_\circ = ۱۰ \times ۵ + ۱۰ \times ۱۰ = ۱۵۰\ kN/m^۲ \\ \sigma'_c = ۱۸ \times ۵ + ۱۰ \times ۱۰ = ۱۹۰\ kN/m^۲ \end{cases} \Rightarrow OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ} = \frac{۱۹۰}{۱۵۰} = ۱/۲۷$$

و این موضوع یعنی OCR در نقاط مختلف لایه متفاوت بوده و عوض می‌شود. در مقاصد عملی معمولاً وسط لایهٔ رسی را ملاک قرار داده و نسبت پیش تحکیمی در این نقطه را به‌عنوان OCR خاک مدنظر قرار می‌دهیم.

تمرین ۱۰: دو پروفیل (۱) و (۲) در شکل مقابل را در نظر بگیرید که در هر کدام از آنها یک لایهٔ رسی اشباع به ضخامت ۱۰ متر نشان داده شده است. پروفیل (۱) قبلاً تحت هیچ باری نبوده است ولی پروفیل (۲) مدت‌ها قبل در اثر خاکریزی در یک سطح وسیع، بار $100\ kN/m^2$ را تحمل کرده است.



پروفیل (۱)



پروفیل (۲)

الف) نسبت پیش‌تحکیمی (OCR) در وسط این لایه‌ها چقدر است؟

ب) اگر بار گستردهٔ $q = 50\ kN/m^2$ در یک سطح وسیع روی سطح خاک این پروفیل‌ها اعمال شود، مدت مدیدی بعد از بارگذاری، OCR در وسط لایه‌ها چقدر خواهد شد؟

ج) اگر بار گستردهٔ $q = 50\ kN/m^2$ را برداریم، مدت مدیدی بعد از باربرداری، OCR در وسط لایه‌ها را تعیین کنید.

● حل

الف) طبق توضیحات داده شده در صورت سؤال، خاک رس پروفیل (۱) عادی تحکیم یافته بوده و OCR در تمام نقاط آن از جمله در وسط لایه (نقطهٔ A) برابر یک است. این در حالی است که خاک رس پروفیل (۲) به‌علت بار $100\ kN/m^2$ که قبلاً تجربه کرده است، با تجربه و پیش‌تحکیم یافته شده است. پس OCR در وسط آن (نقطهٔ B) برابر است با:

$$(OCR)_B = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} = \frac{5\times10+100}{5\times10} = \frac{150}{50} = 3$$

ب) مدت مدیدی پس از اعمال بار $50\ kN/m^2$ بر سطح خاک، تنش مؤثر موجود در وسط هر دو پروفیل برابر مقدار زیر است:

$$\sigma'_0 = \gamma' z + q = 10\times5+50 = 100\ kN/m^2$$

برای نقطه A که در وسط پروفیل (۱) قرار دارد، مقدار فوق بیشترین تنش مؤثری است که تاکنون تجربه شده است، بنابراین $\sigma'_c = \sigma'_0 = 100\ kN/m^2$ بوده و $(OCR)_A = 1$ می‌باشد. اما برای نقطهٔ B (وسط رس در پروفیلِ دو) بیشترین تنش مؤثر تجربه شده همان $150\ kN/m^2$ است که در قسمت (الف) آن را لحاظ کردیم. پس $(OCR)_B$ برابر است با:

$$(OCR)_B = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} = \frac{150}{100} = 1/5$$

ج) با برداشتن بار $50\ kN/m^2$ از سطح خاک، پس از مدت مدیدی تنش مؤثر در وسط هر دو پروفیل به مقدار اولیهٔ $50\ kN/m^2$ باز می‌گردد. در این شرایط بیشترین تنش مؤثر تجربه شده در وسط خاک رس در این پروفیل‌ها برابر است با:

$(\sigma'_c)_A = 100\ kN/m^2$ (این اتفاق در قسمت ب افتاده است)

$(\sigma'_c)_B = 150\ kN/m^2$ (این اتفاق قبلاً و پیش از قسمت ب رخ داده بود)

پس در نهایت OCR در نقاط A و B برابر می‌شود با:

$$(OCR)_A = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} = \frac{100}{50} = 2$$

$$(OCR)_B = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} = \frac{150}{50} = 3$$

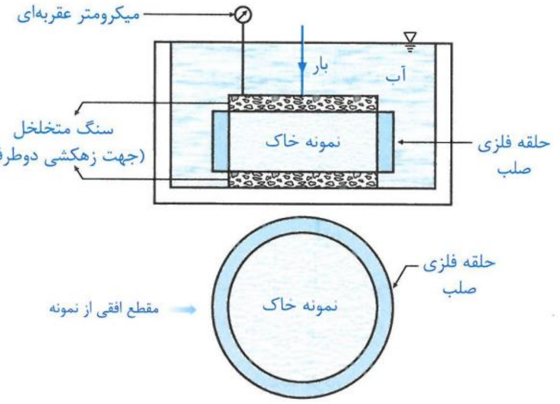
نتیجه مهم

در این تمرین، فرآیند بارگذاری و باربرداری بار $q = 50\ kN/m^2$، باعث افزایش OCR خاک رس موجود در پروفیل (۱) شد ولی در OCR خاک رس موجود در پروفیل (۲) تغییری ایجاد نکرد. علت این موضوع را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

فرآیند بارگذاری و باربرداری زمانی باعث افزایش OCR در خاک رس می‌شود که بار موردنظر بزرگتر از باری باشد که احتمالاً خاک رس خیلی قبل‌تر تحمل کرده است. واضح است که اگر خاک رس عادی تحکیم یافته بوده و قبلاً بار تحمل نکرده باشد، در هر صورت OCR آن افزایش یافته و از یک بیشتر می‌شود.

B-۱- معرفی آزمایش تحکیم یک بعدی استاندارد

آزمایش تحکیم یک بعدی که به **آزمایش ادومتری** نیز معروف است، بر روی نمونه‌ای کم ضخامت از خاک رس اشباع انجام می‌شود، نمونه‌ای که دور تا دور آن را یک حلقهٔ فلزی صلب احاطه کرده است. این حلقهٔ صلب از تغییر شکل جانبی نمونه جلوگیری کرده و باعث می‌شود تا تغییر حجم خاک تنها در راستای قائم (راستای بارگذاری) اتفاق بیافتد و تحکیم به‌صورت یک بعدی انجام شود، در ضمن آب نیز از طریق سنگ‌های متخلخلی که در بالا و پایین نمونه قرار دارند از آن خارج می‌شود تا زهکشی دوطرفه اتفاق بیافتد. تصویر زیر شکل کلی این آزمایش را نشان می‌دهد:



مراحل انجام آزمایش تحکیم یک بعدی به شرح زیر است:

مرحله اول: نمونه‌ای از خاک رس با ابعاد مشخص را مطابق شکل بالا در محفظهٔ دستگاه ادومتر قرار می‌دهیم.

مرحله دوم: پس از پر کردن محفظه با آب، ۲۴ ساعت صبر می‌کنیم تا خاک رس اشباع شود.

مرحله سوم: بارگذاری را با اعمال بار kg/cm^2 ۰/۲۵ شروع می‌کنیم و پس از ۲۴ ساعت، میزان فشردگی خاک را توسط میکرومتر عقربه‌ای (*gage*) اندازه می‌گیریم. سپس بار را دو برابر کرده و ۲۴ ساعت دیگر صبر می‌کنیم تا مجدداً فشردگی خاک را ثبت نماییم. این روند (یعنی دو برابر کردن بار و ۲۴ ساعت فرصت برای تحکیم نمونه) آنقدر ادامه می‌یابد تا تنش ناشی از بارگذاری در آزمایشگاه برابر تنشی شود که خاک در اثر ساخته شدن سازه بر روی آن قرار است تحمل کند.

مرحلهٔ چهارم: در آخرین مرحله از آزمایش تحکیم، نمونه را در کوره خشک کرده و وزن خشک (W_s) آن را اندازه می‌گیریم تا بعداً در محاسبات مربوط به نسبت تخلخل خاک از آن استفاده کنیم.

تذکر: در آزمایش تحکیم یک‌بعدی، قطر نمونه برابر ۲/۵ اینچ (حدود ۶ سانتی‌متر) و ارتفاع آن برابر ۱/۰ اینچ (حدود ۲/۵ سانتی‌متر) است. این ضخامتِ کم نمونه باعث می‌شود تا فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر آن قبل از بارگذاری ناچیز و تقریباً برابر صفر باشد. بنابراین می‌توان گفت:

$$u \simeq \Delta u \quad , \quad \sigma' \simeq \Delta\sigma'$$

در ادامه با طرح چند سؤال مهم اهداف اصلی این آزمایش را بررسی می‌کنیم:

زیر شاخه‌های قسمت دوم

B-۱- معرفی آزمایش تحکیم یک بعدی استاندارد
B-۲- نکات تکمیلی آزمایش تحکیم یک بعدی

بررسی چند سوال

سؤال ۱: نسبت تخلخل خاک در آزمایش تحکیم در پایان هر مرحله از بارگذاری چگونه محاسبه می‌شود؟

● پاسخ: در فصل اول دیدیم که بین تغییرات نسبت تخلخل و تغییرات حجم، رابطهٔ زیر برقرار است:

$$\frac{\Delta V}{V_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ}$$

حال با در نظر گرفتن شرایط تحکیم یک بعدی، رابطهٔ بالا به شکل زیر در می‌آید ($A_\circ$ سطح مقطع نمونه است):

$$\frac{\Delta V}{V_\circ}=\frac{A_\circ\times\Delta H}{A_\circ\times H_\circ}=\frac{\Delta H}{H_\circ}\ \Rightarrow\ \frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ}$$

Δe تغییرات نسبت تخلخل در پایان هر مرحله از بارگذاری بوده و برابر است با:

$$\Delta e=e_\circ-e$$

پس ما می‌توانیم نسبت تخلخل در پایان هر مرحله از بارگذاری (e) را به‌صورت زیر محاسبه کنیم:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{e_\circ-e}{1+e_\circ}\ \Rightarrow\ e=e_\circ-\frac{\Delta H}{H_\circ}(1+e_\circ)$$

در رابطهٔ بالا:

ΔH: میزان نشست خاک در پایان هر مرحله از بارگذاری است که توسط میکرومتر عقربه‌ای ثبت می‌شود.

$H_\circ$: ضخامت اولیه نمونه است که معلوم می‌باشد. (یک اینچ)

$e_\circ$: نسبت تخلخل اولیهٔ نمونه است که به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$e_\circ=\frac{V_v}{V_s}=\frac{V_\circ-V_s}{V_s}=\frac{V_\circ}{V_s}-1$$

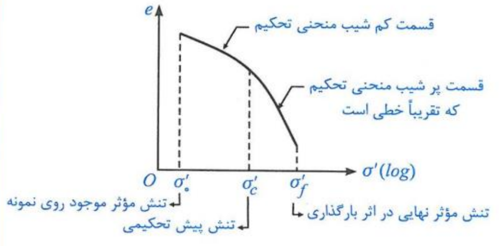
$$V_\circ=\frac{\pi}{4}D^2H_\circ$$

$$V_s=\frac{W_s}{G_s\gamma_w}$$

W_s ← در مرحلهٔ چهارم آزمایش تعیین شد.

سؤال ۲: فرم گرافیکی اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش تحکیم یک بعدی، چه نموداری را به ما می‌دهد و این نمودار دارای چه ویژگی‌هایی است؟

● پاسخ: ما در پایان هر مرحله از بارگذاری، بار و نسبت تخلخل متناظر با آن را داریم و از آنجائیکه بار وارده در پایان هر ۲۴ ساعت به تنش مؤثر تبدیل می‌شود، می‌توانیم نمودار نسبت تخلخل - لگاریتم تنش مؤثر را ترسیم کنیم. این نمودار که به **منحنی تحکیم** معروف است، به‌صورت مقابل می‌باشد:



همانطور که ملاحظه می‌کنید:

● نمودار دارای یک قسمت کم شیب و یک قسمت پر شیب است که این قسمت پر شیب تقریباً خطی می‌باشد.

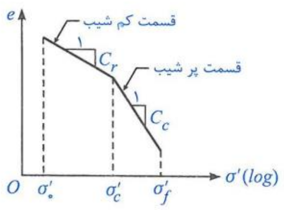
● قسمت کم شیب مربوط به تنش مؤثری است که خاک قبلاً در طول عمر خود تجربه کرده است ولی در موقع نمونه‌گیری از روی خاک برداشته می‌شود.

● قسمت پر شیب نیز تنش مؤثری را نشان می‌دهد که خاک تاکنون آن را تجربه نکرده است و بواسطه آزمایش تحکیم است که آن را برای نخستین بار تجربه می‌کند.

● نقطه تلاقی دو قسمت پر شیب و کم شیب، تنش پیش‌تحکیمی σ'_c را روی محور افقی مربوط به تنش‌ها به ما می‌دهد.

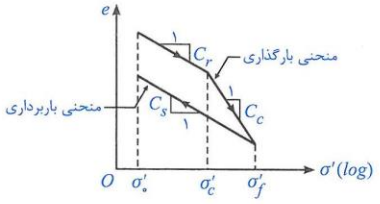
چند تذکر:

۱) منحنی تحکیم را می‌توان با خطی فرض کردن قسمت‌های منحنی، به شکل مقابل به فرم ایده‌آل آن تبدیل کرد.



در منحنی مقابل C_c و C_r نشان‌دهندهٔ شیب مثبت نمودار در قسمت‌های پر شیب و کم شیب هستند و به‌ترتیب **نشانهٔ فشردگی** و **ضریب فشردگی مجدد** نامیده می‌شوند.

۲) اگر نمونه باربرداری شود، متورم شده و نسبت تخلخل در آن افزایش می‌یابد. در این شرایط نمودار مربوط به منحنی باربرداری، دارای شیب مثبت C_s خواهد بود که به آن **نشانهٔ تورم** می‌گوییم و جالب است بدانید که C_s با C_r برابر است.



تمرین ۱۱: در طی آزمایش تحکیم یک‌بعدی (و کلاً فرآیند تحکیم)، هر یک از مشخصات زیر در خاک رس چگونه تغییر می‌کند؟

الف) نسبت تخلخل **ب) درصد رطوبت** **ج) درجهٔ اشباع** **د) وزن مخصوص خشک خاک**

● حل:

الف) طبق مطالب گفته شده و نیز با توجه به منحنی تحکیم، واضح است که با پیشروی تحکیم نسبت تخلخل خاک (e) کم می‌شود.

ب) با پیشروی تحکیم مقداری آب از خاک خارج می‌شود و در نتیجه وزن آب کم می‌شود. در این شرایط چون وزن دانه‌های جامد ثابت است، بنابراین طبق رابطهٔ $\omega = \frac{W_w}{W_s}$، میزان رطوبت (درصد رطوبت) خاک نیز کم خواهد شد.

ج) در سراسر آزمایش تحکیم، درجهٔ اشباع خاک برابر یک بوده و ثابت است.

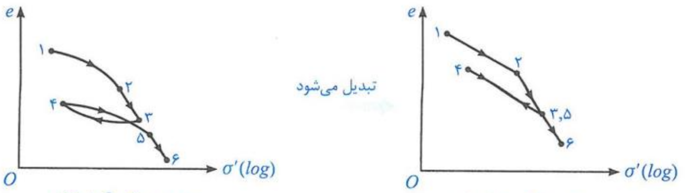
د) همانطور که گفتیم، در آزمایش تحکیم وزن دانه‌های جامد خاک ثابت است ولی چون حجم خاک با خروج آب کاهش می‌یابد، بنابراین طبق رابطهٔ $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$، وزن مخصوص خشک خاک افزایش می‌یابد.

پس از یادگیری مفاهیم اصلی آزمایش تحکیم، در ادامه به بررسی نکات تکمیلی این آزمایش می‌پردازیم.

B-۲- نکات تکمیلی آزمایش تحکیم یک بعدی

نکات تکمیلی در خصوص آزمایش تحکیم به شرح زیر است:

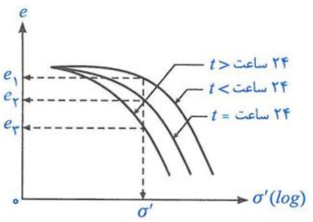
نکته ۱: اگر بخواهیم آزمایش تحکیم را به‌گونه‌ای انجام دهیم که شامل یک مرحلهٔ بارگذاری، یک مرحلهٔ باربرداری و یک مرحلهٔ بارگذاری مجدد باشد، در آن‌صورت می‌توان یک **منحنی آزمایشگاهی کامل** برای تحکیم ترسیم کرد. این منحنی اگر به‌صورت خطی و در حالت ایده‌آل ترسیم شود، در آن‌صورت به آن **منحنی تحکیم کامل محاسباتی** می‌گوییم.



منحنی تحکیم آزمایشگاهی   منحنی تحکیم محاسباتی

در منحنی تحکیم محاسباتی، شیب مثبت ناحیه (۳ → ۲) و (۶ → ۵) همان نشانه یا ضریب فشردگی است که در بخش قبلی تعریف کردیم. دقت شود که نشانه فشردگی را با C_c نشان می‌دهیم و مخفف عبارت *Coefficent of Compression* می‌باشد. به‌همین ترتیب شیب مثبت نواحی (۴ → ۳) و (۳ → ۴) را به‌ترتیب نشانهٔ تورم (C_s) و ضریب بارگذاری مجدد (C_r) می‌نامند که مخفف عبارت‌های *Coefficent of Swelling* و *Coefficent of Recompression* هستند و با یکدیگر برابر می‌باشند. شیب مثبت ناحیه (۲ → ۱) را نیز که با شیب مثبت دو ناحیه اخیر برابر است، با $C_r = C_s$ نشان می‌دهند.

نکته ۲: زمان انجام آزمایش تحکیم معمولاً طولانی بوده و گاهی اوقات مجبور به انجام آن در زمان کوتاه‌تری می‌باشیم. کم کردن زمان بارگذاری باعث می‌شود تا عمل تحکیم به‌خوبی انجام نشود و به نسبت‌های تخلخل بیشتری نسبت به زمان استاندارد (۲۴ ساعت) برسیم. شکل زیر سه منحنی تحکیم در مدت زمان‌های بارگذاری متفاوت را در حالی با هم مقایسه می‌کند که نسبت افزایش بارگذاری آنها با یکدیگر برابر بوده و مطابق حالت استاندارد است.



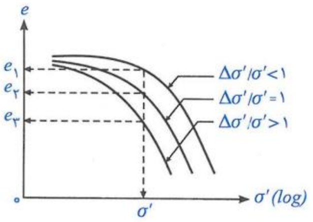
نکته ۳: می‌دانیم در آزمایش تحکیم استاندارد، بار در هر مرحله دو برابر مرحلهٔ قبل از خود می‌شود، بنابراین نسبت افزایش بارگذاری برابر است با:

$$\frac{\Delta\sigma'}{\sigma'}=\frac{\sigma'_2-\sigma'_1}{\sigma'_1}=\frac{2\sigma'_1-\sigma'_1}{\sigma'_1}=1$$

حال فرض کنید که مدت زمان بارگذاری برابر مقدار استاندارد یعنی ۲۴ ساعت باشد ولی بخواهیم نسبت افزایش بارگذاری $(\frac{\Delta\sigma'}{\sigma'})$ را تغییر دهیم. در این شرایط ، شدت تحکیم نیز تغییر می‌کند و مطابق نمودار روبرو خواهد بود:

$\frac{\Delta\sigma'}{\sigma'}<1 \Rightarrow$ شدت تحکیم کم می‌شود $\Rightarrow$ e زیاد می‌شود

$\frac{\Delta\sigma'}{\sigma}>1 \Rightarrow$ شدت تحکیم زیاد می‌شود $\Rightarrow$ e کم می‌شود



در ادامه پس از حل یک تمرین مفهومی، این قسمت از فصل را به پایان می‌رسانیم.

تمرین ۱۲: در یک آزمایش تحکیم یک‌بعدی، مدت زمان اعمال بار در هر مرحله ۱۲ ساعت است. کدام‌یک از راهکارهای زیر در خصوص بارگذاری می‌تواند شرایطی مشابه با شرایط آزمایش تحکیم استاندارد را فراهم کند؟

۱) افزایش بارگذاری برابر مقدار بار موجود روی نمونه باشد.
۲) افزایش بارگذاری کوچکتر از مقدار بار موجود روی نمونه باشد.
۳) افزایش بارگذاری بزرگتر از مقدار بار موجود روی نمونه باشد.
۴) هیچکدام

حل: از آنجائیکه ۲۴ ساعت $> t$ است، بنابراین شدت تحکیم نسبت به حالت استاندارد کمتر است. برای جبران این موضوع می‌توانیم با افزایش نسبت بارگذاری به مقدار بزرگتر از یک، شدت تحکیم را افزایش داده و شرایطی مشابه با آزمایش تحکیم استاندارد به‌وجود آوریم:

افزایش بارگذاری $(\Delta\sigma')$ بزرگتر از مقدار بار موجود روی نمونه (σ') باشد. $\Leftarrow$ $\frac{\Delta\sigma'}{\sigma'}>1 \Rightarrow \Delta\sigma'>\sigma'$

بنابراین گزینه (۳) پاسخ صحیح این تست است.

قسمت سوم (C): نشست نهایی تحکیم اولیه

در آزمون‌های کارشناسی ارشد، محاسبات مربوط به تحکیم اهمیت زیادی داشته و حدود ۲۰ درصد سؤالات آزمون خاک و پی را به خود اختصاص می‌دهد. این محاسبات شامل تعیین نشست نهایی در فرآیند تحکیم اولیه، تعیین فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر در حین تحکیم و نیز تعیین نشست در زمان‌های مختلف در طول تحکیم است که با استفاده از مفهومی به‌نام درصد تحکیم انجام می‌شود. با توجه به تجربیات فراوان در تدریس این درس و برای درک بهتر و تسلط بیشتر شما عزیزان، در ادامهٔ فصل می‌خواهیم با گام‌بندی و طبقه‌بندی مسائل، به شما کمک کنیم تا به راحتی بتوانید این سؤالات را در کنکور پاسخ دهید.

ما در این قسمت مسائل مربوط به محاسبهٔ نشست نهایی در فرآیند تحکیم اولیه را (بسته به روش به‌کار رفته در حل آنها) به سه دسته تقسیم می‌کنیم که در هر دسته، یکی از روش‌های محاسبهٔ نشست تحکیم را به شما یاد می‌دهیم.* شما باید با توجه به اطلاعات صورت سؤال، روش مناسب را برای حل سؤال تشخیص داده و با استفاده از آن نشست نهایی ناشی از تحکیم اولیه را محاسبه کنید.

C-۱- آشنایی با مسائل دستهٔ اول (استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل)

هرگاه نسبت تخلخل خاک در ابتدای تحکیم ($e_\circ$) و در انتهای آن (e_f) معلوم باشد و یا بتوانیم مقدار آنها را با استفاده از روابط وزنی و حجمی فصل اول بیابیم، در آن‌صورت می‌توان برای محاسبهٔ نشست نهایی تحکیم اولیه از رابطهٔ کلی تغییر شکل خاک در حالت یک بعدی کمک گرفت:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ}\ ,\ \Delta e=e_\circ-e_f\ \Rightarrow\ \boxed{\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{e_\circ-e_f}{1+e_\circ}}$$

در رابطهٔ بالا ΔH نشست تحکیم نهایی و $H_\circ$ ضخامت خاک است و به نسبت آنها یعنی $\frac{\Delta H}{H_\circ}$، **تغییر طول نسبی** یا **تغییر ضخامت نسبی** می‌گویند.

نکات مفید در حل مسائل این دسته:

۱) ممکن است در صورت سؤال به‌جای نسبت تخلخل خاک در ابتدا و انتهای تحکیم، پارامترهایی مثل رطوبت یا انواع وزن مخصوص‌های خاک داده شوند. در این شرایط باید ابتدا با کمک روابط وزنی و حجمی در فصل اول مقادیر $e_\circ$ و e_f را بیابیم و سپس با استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل، نشست تحکیم را محاسبه کنیم. دو رابطهٔ زیر، پرکاربردترین روابط وزنی و حجمی هستند که ما در اینجا از آنها استفاده می‌کنیم:

۱) $\omega\, G_s = S_r\, e \Rightarrow$ e به‌دست می‌آید (ω: معلوم، G_s: معلوم، S_r: یک)

۲) $\gamma=\gamma_{sat}=\frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w \Rightarrow$ e به‌دست می‌آید (γ_{sat}: معلوم، G_s: معلوم، γ_w: معلوم)

---

* سایر موضوعات مرتبط با محاسبهٔ نشست تحکیم را در قسمت‌های بعدی این فصل بیان می‌کنیم.

زیر شاخه‌های قسمت سوم

C-۱- آشنایی با مسائل دستهٔ اول (استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل)
C-۲- آشنایی با مسائل دستهٔ دوم (استفاده از تاریخچهٔ بارگذاری و نمودار تحکیم)
C-۳- آشنایی با مسائل دستهٔ سوم (استفاده از ضریب تغییر حجم)

۲ در برخی از مسائل دستهٔ اول ممکن است مقدار نشست یا تغییر ضخامت نسبی خاک را به ما بدهند و مقادیر نسبت تخلخل، درصد رطوبت، وزن مخصوص و ... را در ابتدا یا انتهای تحکیم بخواهند. در این شرایط باز هم از رابطه کلی تغییر شکل استفاده می‌کنیم و نسبت تخلخل را می‌یابیم. سپس درصورت نیاز مقادیر رطوبت، وزن مخصوص و ... را نیز با کمک روابط وزنی و حجمی فصل اول به‌دست می‌آوریم.

۳ نسبت وزن مخصوص خشک خاک در انتها به ابتدای تحکیم را می‌توان به‌سادگی به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\frac{\gamma_{d_f}}{\gamma_{d_\circ}}=\frac{\dfrac{G_s\,\gamma_w}{1+e_f}}{\dfrac{G_s\,\gamma_w}{1+e_\circ}}=\frac{1+e_\circ}{1+e_f}$$

در ادامه با حل چند تمرین متنوع مسائل این دسته را بررسی می‌کنیم.

تمرین ۱۳: یک لایه خاک ریزدانه با نسبت منافذ (نشانهٔ خلاء) اولیه $e_\circ=0/6$ و ضخامت ۴ متر تحکیم یافته و نسبت منافذ آن در انتها به $e_f=0/57$ کاهش یافته است. مقدار نشست لایهٔ خاک برحسب cm چقدر می‌باشد؟ (سراسری – ۸۴)

۱) ۱۰ ۲) ۱۲/۵ ۳) ۵ ۴) ۷/۵

● حل: با داشتن $e_\circ$ و e_f، نشست نهایی خاک به‌سادگی محاسبه می‌شود:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{e_\circ-e_f}{1+e_\circ}\ \Rightarrow\ \frac{\Delta H}{4}=\frac{0/6-0/57}{1+0/6}\ \Rightarrow\ \Delta H=0/075\,m=7/5\,cm$$

بنابراین گزینه (۴) صحیح است.

تمرین ۱۴: روی مصالح ریزدانه‌ای با $G_s=2/5$، آزمایش ادومتری (تحکیم) انجام شده است. در پایان آزمایش رطوبت نمونه $\omega=20\%$ و تغییرطول نسبی آن نیز ۲۰٪ به‌دست آمده‌اند. ضریب تخلخل اولیه نمونه $e_\circ$ چقدر است؟ (سراسری – ۸۸)

۱) ۰/۵۵ ۲) ۰/۶۶ ۳) ۰/۷۷ ۴) ۰/۸۸

● حل: با توجه به داده‌های سؤال، ابتدا e_f را محاسبه کرده و در گام بعد، $e_\circ$ را محاسبه می‌کنیم:

$$\omega G_s=S_r e\ \xrightarrow{S_r=1}\ 0/2\times 2/5=1\times e_f\ \Rightarrow\ e_f=0/5$$

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{e_\circ-e_f}{1+e_\circ}\ \Rightarrow\ 0/2=\frac{e_\circ-0/5}{1+e_\circ}\ \Rightarrow\ e_\circ=\frac{7}{8}\simeq 0/88$$

تغییر طول نسبی = ۲۰٪ = ۰/۲

بنابراین گزینه (۴) صحیح است.

تمرین ۱۵: لایه‌ای از خاک رس اشباع به ارتفاع ۱۰ متر، وزن مخصوص اشباع اولیه $2t/m^3$ و تودهٔ ویژهٔ $G_s=2/5$ موردنظر است. درصورتی‌که نشست نهایی لایه رس پس از ۶۰ سال برابر ۱۰ سانتی‌متر باشد؛

الف) نسبت تخلخل خاک در انتهای تحکیم چه میزان است؟ (سراسری – ۸۷)

ب) درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک خاک در انتهای تحکیم را به‌دست آورید.

● حل:

الف) ابتدا $e_\circ$ را با دانستن مقدار γ_{sat} اولیهٔ خاک به‌دست آورده و سپس با رابطهٔ کلی تغییر شکل، e_f را می‌یابیم:

$$\gamma=\gamma_{sat}=\frac{G_s+e}{1+e}\gamma_w\ \Rightarrow\ 2=\frac{2/5+e_\circ}{1+e_\circ}\times 1\ \Rightarrow\ e_\circ=0/5$$

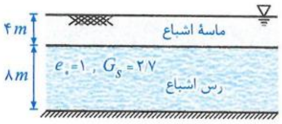
$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{e_\circ-e_f}{1+e_\circ}\ \Rightarrow\ \frac{0/1}{10}=\frac{0/5-e_f}{1+0/5}\ \Rightarrow\ e_f=0/485$$

ب) پس از محاسبهٔ e_f، به‌سادگی ω_f و γ_{d_f} در پایان فرآیند تحکیم به‌دست می‌آیند:

$$\omega G_s=S_r e\ \xrightarrow{S_r=1}\ \omega_f\times 2/5=1\times 0/485\ \Rightarrow\ \omega_f=0/194=19/4\%$$

$$\gamma_{d_f}=\frac{G_s\,\gamma_w}{1+e_f}=\frac{2/5\times 1}{1+0/485}=1/68\ t/m^3$$

تمرین ۱۶: در پروفیل شکل زیر در اثر نوعی بارگذاری گسترده بر روی سطح خاک، لایهٔ رس $40cm$ نشست می‌کند. با انجام این نشست پوکی خاک رس (n) چند برابر می‌شود؟



۱) ۰/۹
۲) ۰/۹۲
۳) ۰/۹۵
۴) ۰/۸۸

حل: برای محاسبهٔ نسبت پوکی خاک در پایان تحکیم به ابتدای تحکیم، کافیست مقادیر $e_{\circ}$ و e_f را بدانیم:

$$\begin{cases} \dfrac{n_f}{n_{\circ}}=\dfrac{(\frac{e_f}{1+e_f})}{(\frac{e_{\circ}}{1+e_{\circ}})}=\dfrac{e_f}{e_{\circ}}\times\dfrac{1+e_{\circ}}{1+e_f} \\ \dfrac{\Delta H}{H_{\circ}}=\dfrac{e_{\circ}-e_f}{1+e_{\circ}} \Rightarrow \dfrac{0.4}{8}=\dfrac{1-e_f}{1+1} \Rightarrow e_f=0.9 \end{cases} \Rightarrow \dfrac{n_f}{n_{\circ}}=\dfrac{0.9}{1}\times\dfrac{1+1}{1+0.9}=\dfrac{18}{19}=0.95$$

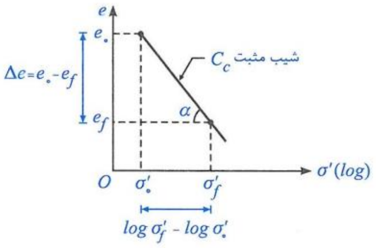
بنابراین گزینه (۳) صحیح است.

C-۲- آشنایی با مسائل دستهٔ دوم (استفاده از تاریخچهٔ بارگذاری و نمودار تحکیم)

اگر در یک لایهٔ رسی اطلاعات لازم برای به‌دست آوردن تنش مؤثر، مشخص یا قابل محاسبه بوده و علاوه بر آن مقادیر بار وارده و ضرایب C_c یا C_r (C_s) نیز داده شده باشد، در آن‌صورت با توجه به اینکه خاک رس عادی تحکیم یافته یا پیش‌تحکیم یافته است، به‌سادگی می‌توان نشست آن را مشخص کرد. در اینگونه از سؤالات با دو حالت زیر برخورد می‌کنیم:

حالت اول: اگر خاک رس عادی تحکیم یافته باشد ($OCR=1$)

در این شرایط، خاک رس تنش‌های ناشی از بارگذاری را قبلاً تجربه نکرده است و به‌همین دلیل نمودار تحکیم محاسباتی آن مطابق شکل مقابل و به‌صورت یک خط راست با شیب تند $tan\ \alpha=C_c$ است.



حال با توجه به شکل می‌توان مقدار Δe را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$tan\ \alpha=\dfrac{\text{ضلع مقابل}}{\text{ضلع مجاور}}=\dfrac{\Delta e}{log\ \sigma'_f-log\ \sigma'_{\circ}} \Rightarrow C_c=\dfrac{\Delta e}{log\,(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{\circ}})} \Rightarrow \Delta e=C_c\ log\,(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{\circ}})$$

و در نهایت با استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل و جایگذاری مقدار Δe در آن، رابطهٔ محاسبهٔ نشست تحکیم در این حالت به‌دست می‌آید:

$$\dfrac{\Delta H}{H_{\circ}}=\dfrac{\Delta e}{1+e_{\circ}} \Rightarrow \Delta H=\dfrac{H_{\circ}}{1+e_{\circ}}\Delta e \Rightarrow \boxed{\Delta H=\dfrac{H_{\circ}}{1+e_{\circ}}C_c\ log\,(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_{\circ}})}$$

چند تذکر مهم در ارتباط با رابطه فوق:

۱) همانطور که مشاهده کردید اگر مقدار Δe را بدانیم، به‌سادگی با ضرب آن در $\dfrac{H_{\circ}}{1+e_{\circ}}$، مقدار ΔH در انتهای فرآیند تحکیم به‌دست می‌آید.

۲) در رابطهٔ به‌دست آمده، $H_{\circ}$ ضخامت اولیه لایهٔ رسی است و $e_{\circ}$ نیز نسبت تخلخل اولیهٔ خاک می‌باشد. $\sigma'_{\circ}$ و σ'_f نیز به‌ترتیب تنش مؤثر موجود و تنش مؤثر نهایی در **وسط لایهٔ رسی** می‌باشند.

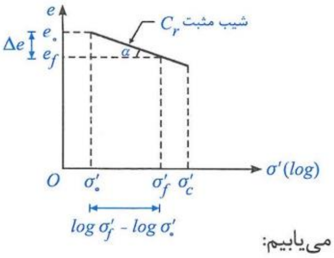
۳) برای انواع بارگذاری‌ها مطابق مطالب خوانده شده در فصل قبل، σ'_f برابر $\sigma'_{\circ}+\Delta\sigma'$ می‌باشد که در آن $\Delta\sigma'$ اضافه تنش مؤثر در انتهای تحکیم اولیه است. توجه کنید که مقدار $\Delta\sigma'$ نیز در **وسط لایهٔ رسی** مدنظر می‌باشد و به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{cases} \text{بار گستردهٔ } q \text{ در سطح وسیع} \Rightarrow \Delta\sigma'=q \\ \text{بار } P \text{ روی یک پی به ابعاد } B\times L \Rightarrow \Delta\sigma'=\dfrac{P}{(B+z_{\text{وسط رس}})(L+z_{\text{وسط رس}})} \end{cases}$$

حالت دوم: اگر خاک رس پیش‌تحکیم یافته باشد ($OCR > 1$)

در این شرایط با توجه به مقایسهٔ تنش مؤثر نهایی (σ'_f) و تنش پیش‌تحکیمی (σ'_c) در وسط لایه رسی، یکی از دو حالت زیر رخ می‌دهد:

۱ $\sigma'_f < \sigma'_c$:

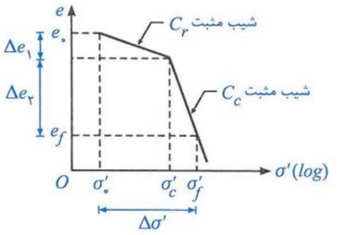


در این حالت تنش مؤثر نهایی کمتر از تنش پیش تحکیمی بوده و خاک تنش‌های ناشی از بارگذاری را قبلاً تجربه کرده است، بنابراین منحنی تحکیم محاسباتی آن مطابق شکل مقابل و به‌صورت یک خط راست با شیب نسبتاً کم $tan\ \alpha = C_r$ است.

حال با توجه به شکل بالا و مشابه با حالت رس عادی تحکیم یافته، مقدار ΔH در این حالت را می‌یابیم:

$$\begin{cases} \Delta H = \dfrac{H_0}{1+e_0}\Delta e \\ \Delta e = C_r\, log\,(\dfrac{\sigma'_f}{\sigma'_0}) \end{cases} \Rightarrow \boxed{\Delta H = \dfrac{H_0}{1+e_0} C_r\, log\,(\dfrac{\sigma'_f}{\sigma'_0})}$$

۲ $\sigma'_f > \sigma'_c$:



در این حالت تنش مؤثر نهایی بیشتر از تنش پیش‌تحکیمی بوده و خاک رس در حین بارگذاری، تنش‌های جدیدی را تجربه خواهد کرد. منحنی تحکیم محاسباتی در این شرایط از σ'_0 تا σ'_c (که خاک قبلاً آن را تجربه کرده است) یک خط راست با شیب نسبتاً کم C_r و از σ'_c تا σ'_f (که خاک قبلاً آن را تجربه نکرده است) یک خط راست با شیب نسبتاً زیاد C_c می‌باشد. با توجه به این موضوع، مقدار ΔH در این حالت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \Delta H = \dfrac{H_0}{1+e_0}\Delta e \\ \Delta e = \Delta e_1 + \Delta e_2 = C_r\, log\,(\dfrac{\sigma'_c}{\sigma'_0}) + C_c\ log\,(\dfrac{\sigma'_f}{\sigma'_c}) \end{cases} \Rightarrow \boxed{\Delta H = \dfrac{H_0}{1+e_0}[C_r\, log\,(\dfrac{\sigma'_c}{\sigma'_0}) + C_c\ log\,(\dfrac{\sigma'_f}{\sigma'_c})]}$$

تذکر: همانطور که ملاحظه می‌کنید، در حالت رس پیش‌تحکیم یافته نیز مانند رس عادی تحکیم یافته، σ'_0، σ'_c و σ'_f در **وسط لایهٔ رسی** موردنظر است.

قبل از بررسی تمرین‌های این دسته، مطالب فوق را جمع‌بندی کرده و یک روش گام به گام ارائه می‌کنیم.

جمع‌بندی مطالب و روش گام به گام

برای حل مسائل دستهٔ دوم و محاسبهٔ نشست تحکیم اولیه، می‌توانید طبق گام‌بندی زیر عمل کنید:

گام اول: تعیین نوع خاک رس و مشخص کردن σ'_c

در این گام مشخص می‌کنیم که خاک رس عادی تحکیم یا پیش تحکیم یافته است و تنش پیش تحکیمی آن (σ'_c) را به‌دست می‌آوریم.

برای این کار با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، یکی از دو حالت زیر اتفاق می‌افتد:

الف) اگر OCR خاک داده شده باشد، نوع خاک رس به سادگی مشخص می‌شود:

$$\begin{cases} OCR = 1 \Rightarrow \text{خاک رس عادی تحکیم یافته است} \Rightarrow \sigma'_c = \sigma'_0 \\ OCR > 1 \Rightarrow \text{خاک رس پیش تحکیم یافته است} \Rightarrow \sigma'_c = OCR \times \sigma'_0 \end{cases}$$

ب) اگر OCR خاک داده نشده باشد، با توجه به اطلاعات مربوط به بارگذاری‌هایی که در گذشته روی خاک اعمال شده است (تاریخچهٔ بارگذاری خاک) تنش‌های σ'_0 و σ'_c را به‌دست آورده و از مقایسهٔ آنها، نوع خاک رس را مشخص می‌کنیم.

$$\begin{cases} \sigma'_c = \sigma'_0 \Rightarrow \text{خاک رس عادی تحکیم یافته است}\ (OCR = 1) \\ \sigma'_c > \sigma'_0 \Rightarrow \text{خاک رس پیش تحکیم یافته است}\ (OCR > 1) \end{cases}$$

گام دوم: تعیین تنش نهایی ایجاد شده در خاک

در این گام با توجه به بارگذاری انجام شده بر روی خاک، ابتدا طبق مطالب گفته شده در فصل قبل، اضافه تنش قائم در وسط رس ($\Delta\sigma'$) را می‌یابیم، سپس تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در وسط لایه رسی (σ'_f) را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

تنش مؤثر اولیه در وسط رس که در گام اول محاسبه شد.

$$\sigma'_f = \sigma'_0 + \Delta\sigma'$$

اضافه تنش ایجاد شده در وسط رس که در ابتدای این گام محاسبه می‌شود.

گام سوم: ترسیم نمودار تحکیم خاک

در این گام تنش‌های σ'_0، σ'_c و σ'_f را که در گام‌های قبلی به‌دست آمدند، روی محور افقی مشخص می‌کنیم و سپس با توجه به نوع خاک و مقادیر تنش‌ها، براساس مطالب گفته شدهٔ قبلی نمودار تحکیم خاک را ترسیم می‌کنیم.

گام چهارم: محاسبهٔ Δe

در این گام با توجه به نمودار تحکیم رسم شده در مرحلهٔ قبل، مقدار Δe ایجاد شده در خاک را به‌دست می‌آوریم.

گام پنجم: محاسبهٔ ΔH

در نهایت Δe به‌دست آمده در گام قبلی را در رابطهٔ کلی تغییر شکل قرار داده و نشست تحکیم خاک را محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \Rightarrow \Delta H = \frac{H_0}{1+e_0}\Delta e$$

تذکر: با روش گام‌بندی ارائه شده می‌توانید بدون حفظ کردن فرمول‌های این دسته، به‌سادگی مسائل مربوط به آن را حل کنید. لازم به ذکر است در صورتی‌که فرمول نشست تحکیم و یا مقادیر تنش‌ها در صورت سؤال داده شده باشند، حل مسئله کوتاه‌تر شده و برخی از گام‌های روش فوق حذف می‌گردند.

تمرین ۱۷: تنش پیش تحکیمی (σ'_c) و تنش مؤثر اولیه (σ'_0) و تنش مؤثر پس از خاتمه عمل تحکیم (σ'_1) در دو حالت (الف) و (ب) به شرح ذیل داده شده‌اند. مقادیر C_c و C_r به‌ترتیب ضریب تراکم و ضریب بارگذاری مجدد می‌باشند. برای محاسبهٔ نشست نهایی تحکیم در هر یک از حالت‌های (الف) و (ب) از کدام رابطه استفاده می‌شود؟

الف) $\sigma'_0 = 100\ kN/m^2$ ، $\sigma'_c = 200\ kN/m^2$ و $\sigma'_1 = 150\ kN/m^2$ (سراسری - ۸۵)

ب) $\sigma'_0 = 100\ kN/m^2$ ، $\sigma'_c = 200\ kN/m^2$ و $\sigma'_1 = 300\ kN/m^2$

۱) $S_c = \frac{H_0}{1+e_0} C_r \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}$

۲) $S_c = \frac{H_0}{1+e_0} C_c \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}$

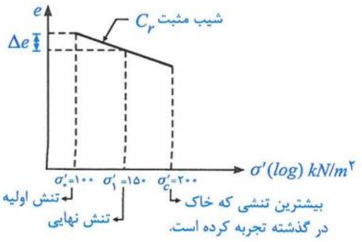
۳) $S_c = \frac{H_0}{1+e_0} [C_r \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + C_c \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_c}]$

۴) $S_c = \frac{H_0}{1+e_0} [C_r \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + C_c \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_1}]$

حل: چون در هر دو قسمت (الف) و (ب) از این سؤال، مقادیر تنش‌های σ'_0، σ'_c و σ'_f ($\sigma'_f = \sigma'_1$) داده شده است، بنابراین دیگر نیازی به انجام محاسبات گام‌های (۱) و (۲) نمی‌باشد و به همین جهت برای به‌دست آوردن پاسخ مسئله به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

الف) گام سوم: ترسیم نمودار تحکیم خاک

در خاک مورد نظر $\sigma'_c > \sigma'_0$ می‌باشد، یعنی خاک رس پیش تحکیم یافته است. حال با توجه به آنکه $\sigma'_1 = \sigma'_f < \sigma'_c$ است، نمودار تحکیم آن به‌صورت شکل مقابل خواهد بود:



گام چهارم: محاسبهٔ Δe

با توجه به نمودار رسم شده، Δe ایجاد شده در خاک برابر است با:

$$\Delta e = C_r \log (\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0})$$

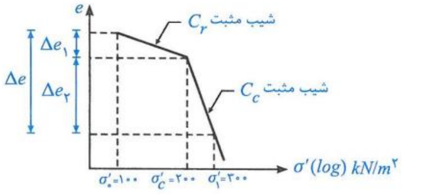
گام پنجم: محاسبهٔ ΔH

در نهایت رابطهٔ نشست تحکیم خاک به‌صورت مقابل به‌دست می‌آید:

$$\Delta H = \frac{H_0}{1+e_0}\Delta e = \frac{H_0}{1+e_0}\left[C_r \log (\frac{\sigma'_1}{\sigma'_0})\right]$$

یعنی در این حالت گزینهٔ (۱) صحیح است.

ب) گام سوم: ترسیم نمودار تحکیم خاک



در این حالت نیز $\sigma'_c < \sigma'_۰$ بوده و خاک رس از نوع پیش تحکیم یافته است، ولی با توجه به آنکه $\sigma'_f > \sigma'_c$ = $\sigma'_۱$ داده شده است، نمودار تحکیم آن به‌صورت مقابل خواهد بود.

گام چهارم: محاسبهٔ Δe

با توجه به نمودار رسم شده، Δe ایجاد شده در این خاک برابر می‌شود با:

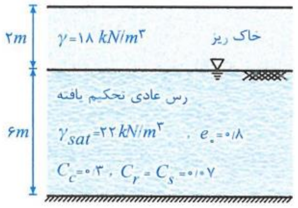
$$\Delta e = C_r\ log\ (\frac{\sigma'_c}{\sigma'_۰}) + C_c\ log\ (\frac{\sigma'_۱}{\sigma'_c})$$

گام پنجم: محاسبهٔ ΔH

در نهایت رابطهٔ نشست تحکیم خاک به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta H = \frac{H_۰}{۱+e_۰}\ \Delta e = \frac{H_۰}{۱+e_۰}\ (\Delta e_۱ + \Delta e_۲) = \frac{H_۰}{۱+e_۰}\ [C_r\ log\ (\frac{\sigma'_c}{\sigma'_۰}) + C_c\ log\ (\frac{\sigma'_۱}{\sigma'_c})]$$

یعنی در این حالت گزینه (۳) صحیح است.



تمرین ۱۸: در زمینی مطابق شکل و در مقیاس گسترده‌ای، ۲ متر خاکریزی انجام می‌گیرد. نشست تحکیم تقریباً چند سانتی‌متر است؟ ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳$ ، $log\ ۲ = ۰/۳$ و $log\ ۳ = ۰/۵$)

(سراسری - ۸۰)

۱) ۵۰   ۲) ۱۵
۳) ۳۰   ۴) ۲۵

● حل: برای پاسخ به سؤال، طبق روش گام‌بندی گفته شده عمل می‌کنیم.

گام اول: تعیین نوع خاک رس و مشخص کردن σ'_c

طبق اطلاعات داده شده در شکل، خاک رس عادی تحکیم یافته است، یعنی $\sigma'_c = \sigma'_۰$ بوده و مقدار آنها در وسط لایهٔ رس برابر است با:

وسط لایه

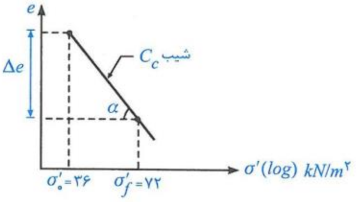
$$\sigma'_c = \sigma'_۰ = \gamma' z = ۱۲ \times ۳ = ۳۶\ kN/m^۲$$

گام دوم: تعیین تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در خاک

$$\sigma'_f = \sigma'_۰ + \boxed{\Delta\sigma'} = ۳۶ + \boxed{۱۸ \times ۲} = ۷۲\ kN/m^۲$$

بارگذاری گستردهٔ $q = \gamma z$

گام سوم: ترسیم نمودار تحکیم خاک



خاک رس عادی تحکیم یافته است، بنابراین نمودار تحکیم آن با توجه به مقادیر تنش‌ها به‌سادگی و به‌صورت شکل مقابل ترسیم می‌شود.

گام چهارم: محاسبهٔ Δe

با توجه به نمودار رسم شده، Δe ایجاد شده در این خاک برابر است با:

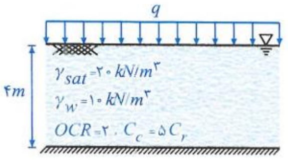
$$\Delta e = C_c\ log\ (\frac{\sigma'_f}{\sigma'_۰}) = ۰/۳ \times log\ (\frac{۷۲}{۳۶}) = ۰/۳\ log\ ۲ = ۰/۳ \times ۰/۳ = ۰/۰۹$$

گام پنجم: محاسبهٔ ΔH

در نهایت مقدار نشست تحکیم خاک برابر می‌شود با:

$$\Delta H = \frac{H_۰}{۱+e_۰}\ \Delta e = \frac{۶}{۱+۰/۸} \times ۰/۰۹ = ۰/۳\ m = ۳۰\ cm$$

تمرین ۱۹: بار گستردهٔ یکنواختی با شدت $q = ۲۰\, kN/m^۲$ مطابق شکل زیر در یک سطح وسیع روی رس اشباع اجرا می‌شود که در این حالت نشست تحکیمی لایهٔ رسی برابر $۶\, cm$ است. اگر شدت بار وارده دو برابر شود، نشست تحکیمی لایهٔ رس چقدر می‌شود؟
$(log\ ۳ = ۰/۵\ ,\ log\ ۲ = ۰/۳)$



۱) $۲۶\, cm$
۲) $۱۲\, cm$
۳) $۵۰\, cm$
۴) $۱۰\, cm$

● پاسخ: ابتدا طبق گام‌بندی گفته شده، چگونگی محاسبهٔ نشست تحکیم در حالت اول (به ازاء بار $q = ۲۰\, kN/m^۲$) را دنبال می‌کنیم و در ادامه نیز خواهیم دید که از نتیجهٔ این محاسبات، در به‌دست آوردن نشست تحکیم خاک در حالت دوم استفاده می‌شود.

گام اول: تعیین نوع خاک رس و مشخص کردن σ'_c

OCR خاک رس داده شده است، بنابراین می‌نویسیم:

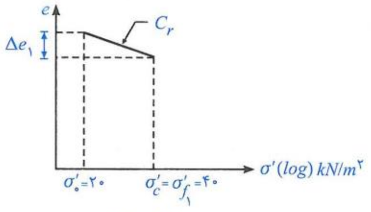
$$\begin{cases} OCR = ۲ > ۱ \Rightarrow \text{خاک رس پیش تحکیم یافته است} \Rightarrow \sigma'_c = OCR \times \sigma'_۰ \\ \sigma'_۰ = \gamma' z = (۲۰ - ۱۰) \times \underbrace{۲}_{\text{وسط رس}} = ۲۰\, kN/m^۲ \end{cases} \Rightarrow \sigma'_c = ۲ \times ۲۰ = ۴۰\, kN/m^۲$$

گام دوم: تعیین تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در وسط لایهٔ رس

$$\sigma'_{f_۱} = \sigma'_۰ + \Delta\sigma'_۱ = ۲۰ + ۲۰ = ۴۰\, kN/m^۲$$

گام سوم: ترسیم نمودار تحکیم خاک

می‌دانیم خاک رس پیش تحکیم یافته بوده و $\sigma'_c > \sigma'_۰$ است. از طرفی $\sigma'_f = \sigma'_c = ۴۰\, kN/m^۲$ می‌باشد، پس منحنی تحکیم خاک رس در این حالت به‌صورت شکل مقابل خواهد بود:



(حالت اول)

گام چهارم: محاسبهٔ $\Delta e_۱$

حال با توجه به نمودار رسم شده، Δe ایجاد شده در خاک را می‌یابیم:

$$\Delta e_۱ = C_r\, log\left(\frac{\sigma'_{f_۱}}{\sigma'_۰}\right) = C_r \times \underbrace{log\frac{۴۰}{۲۰}}_{log\ ۲ = ۰/۳} = ۰/۳\, C_r$$

گام پنجم: محاسبهٔ $\Delta H_۱$

در نهایت با جایگذاری $\Delta e_۱$ در رابطهٔ کلی تغییر شکل، خواهیم داشت:

$$\Delta H_۱ = \frac{H_۰}{۱+e_۰}\Delta e_۱ \Rightarrow ۶ = \frac{۴۰۰}{۱+e_۰} \times ۰/۳\, C_r \Rightarrow \frac{C_r}{۱+e_۰} = ۰/۰۵$$

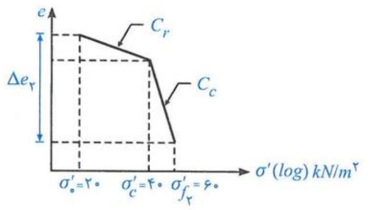
در ادامه می‌خواهیم نشست تحکیم خاک را در حالت دوم ($q_۲ = ۲q = ۴۰\, kN/m^۲$) به‌دست آوریم که البته در محاسبات آن، از نتیجهٔ به‌دست آمده در بالا هم استفاده خواهیم کرد. همچنین طبق محاسبات حالت قبل، می‌دانیم که خاک رس پیش تحکیم یافته بوده و $\sigma'_c = ۴۰\, kN/m^۲$ است، پس حل را از گام دوم شروع می‌کنیم.

گام دوم: تعیین تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در خاک

$$\sigma'_{f_۲} = \sigma'_۰ + q_۲ = ۲۰ + ۴۰ = ۶۰\, kN/m^۲$$

گام سوم: ترسیم نمودار تحکیم خاک

در بارگذاری حالت دوم بر روی این خاک رس پیش تحکیم یافته، $\sigma'_f > \sigma'_c$ شده است. پس با توجه به مقادیر تنش‌ها نمودار تحکیم خاک به‌صورت شکل مقابل رسم می‌شود:



(حالت دوم)

گام چهارم: محاسبهٔ $\Delta e_۲$

از روی نمودار رسم شده، $\Delta e_۲$ را به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$\Delta e_۲ = C_r \log(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ}) + C_c \log(\frac{\sigma'_{f_۲}}{\sigma'_c}) = C_r \log(\frac{۴۰}{۲۰}) + ۵\,C_r \log(\frac{۶۰}{۴۰}) = C_r \underbrace{\log ۲}_{۰/۳} + ۵\,C_r \underbrace{(\log ۳ - \log ۲)}_{۰/۵-۰/۳=۰/۲} = ۱/۳\,C_r$$

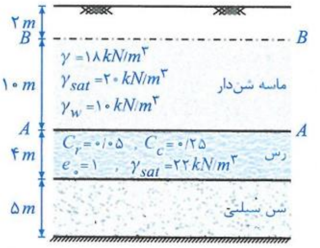
گام پنجم: محاسبهٔ ΔH

در نهایت نشست تحکیم خاک رس در این حالت برابر می‌شود با:

$$\Delta H_۲ = \frac{H_\circ}{۱+e_\circ}\Delta e_۲ = \frac{۴۰۰}{۱+e_\circ} \times ۱/۳\,C_r = ۵۲۰ \times \frac{C_r}{۱+e_\circ} = ۵۲۰ \times ۰/۰۵ = ۲۶\,cm$$

(نتیجهٔ حالت اول: $\frac{C_r}{1+e_\circ} = ۰/۰۵$)

تمرین ۴۰: در پروفیل شکل مقابل تاریخچه وضعیت لایه‌ها چنین بوده است:



الف) سطح آب زیرزمینی در بدو پیدایش لایه‌ها در سطح $A-A$ بوده و مدت مدیدی در این سطح باقی مانده است.

ب) در اثر تغییر شرایط، سطح آب زیرزمینی در تراز $B-B$ قرار گرفته و مدت زیادی در این سطح قرار داشته است.

با وجود سطح آب زیرزمینی در تراز $B-B$ خاکریزی به ارتفاع ۱۰ متر و $\gamma = ۲۰\,kN/m^۳$ برروی سطح زمین ایجاد شده است. نشست تحکیمی ناشی از اعمال این خاکریز را برحسب میلی‌متر مشخص کنید.

$\log ۳ = ۰/۵$ و $\log ۲ = ۰/۳$ و $\Delta H = S_c = \frac{H_\circ}{۱+e_\circ}\left[C_r \log\frac{\sigma'_c}{\sigma_\circ} + C_c \log\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c}\right]$ (سراسری - ۸۳)

۱) ۱۸۰ ۲) ۹۰ ۳) ۱۲۰ ۴) ۶۰

● حل: در این سؤال چون رابطهٔ محاسبهٔ نشست تحکیم داده شده است، دیگر نیازی به رسم نمودار تحکیم (گام سوم) و محاسبهٔ Δe (گام چهارم) نمی‌باشد. پس با حذف این دو گام به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

گام اول: تعیین نوع خاک رس و مشخص کردن σ'_c

از آنجاکه OCR خاک داده نشده است، از تاریخچهٔ بارگذاری پروفیل خاک استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\sigma'_c = \sum(\gamma' z)_i = \underbrace{۱۸ \times ۱۲}_{\text{ناشی از } ۱۲m \text{ شن خشک}} + \underbrace{(۲۲-۱۰)\times ۲}_{\text{ناشی از } ۲m \text{ رس اشباع}} = ۲۴۰\,kN/m^۲$$

(σ'_c: تنش مؤثر در وسط لایهٔ رسی در گذشته (سطح آب در A))

$$\sigma'_\circ = \sum(\gamma' z)_i = \underbrace{۱۸ \times ۲}_{\text{ناشی از } ۲m \text{ شن خشک}} + \underbrace{(۲۰-۱۰)\times ۱۰}_{\text{ناشی از } ۱۰m \text{ شن اشباع}} + \underbrace{(۲۲-۱۰)\times ۲}_{\text{ناشی از } ۲m \text{ رس اشباع}} = ۱۶۰\,kN/m^۲$$

($\sigma'_\circ$: تنش مؤثر در وسط لایهٔ رسی در حال حاضر (سطح آب در B))

ملاحظه می‌کنید که $\sigma'_c > \sigma'_\circ$ است و این یعنی خاک رس پیش تحکیم یافته می‌باشد.

گام دوم: تعیین تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در وسط لایهٔ رس

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۱۶۰ + ۱۰ \times ۲۰ = ۳۶۰\,kN/m^۲$$

همانطور که گفتیم نیازی به طی کردن گام‌های سوم و چهارم نبوده و در ادامه با داشتن مقادیر تنش‌ها و استفاده از فرمول داده شده، نشست تحکیم خاک را به‌دست می‌آوریم.

گام پنجم: محاسبهٔ ΔH

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{۱+e_\circ}\left[C_r \log(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ}) + C_c \log(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c})\right] = \frac{۴}{۱+۱}[۰/۰۵ \log(\frac{۲۴۰}{۱۶۰}) + ۰/۲۵ \log(\frac{۳۶۰}{۲۴۰})] = ۰/۶ \log(\frac{۳}{۲})$$

$$= ۰/۶\,\underbrace{(\log ۳ - \log ۲)}_{۰/۵-۰/۳=۰/۲} = ۰/۱۲\,m = ۱۲\,cm = ۱۲۰\,mm$$

C-۳- آشنایی با مسائل دستهٔ سوم (استفاده از ضریب تغییر حجم)

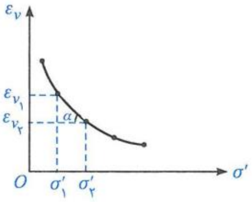
در این قسمت می‌خواهیم نحوهٔ محاسبهٔ نشست تحکیمی را با استفاده از پارامتری به نام **ضریب تغییر حجم** به شما نشان دهیم. پس ابتدا بیایید شما را با این پارامتر و ویژگی‌های آن آشنا کنیم.

ضریب تغییر حجم

فرض کنید که چند نمونه خاک رس مختلف به‌صورت همگن و اشباع در اختیار دارید. اگر بار یکسانی را به آنها اعمال کنید، نمونه‌ای که تغییر حجم بیشتری دارد، نرمتر و تحکیم‌پذیرتر خواهد بود. حال برای آنکه معیاری جهت مقایسه تراکم‌پذیری خاک‌های رسی به‌هنگام تحکیم داشته باشیم، پارامتر m_v را که به آن ضریب **تغییر حجم (ضریب قابلیت فشردگی حجمی)** می‌گوییم، به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$m_v = \frac{(\frac{\Delta V}{V_\circ})}{\Delta\sigma'}$$

ضریب تغییر حجم برای یک نمونه با حجم اولیه $V_\circ$، در حالت کلی برای یک محدودهٔ مشخص از بارگذاری تعریف می‌شود. برای درک بهتر این موضوع به نمودار روبرو توجه کنید:



$$m_v = \tan\alpha = \frac{\text{ضلع مقابل}}{\text{ضلع مجاور}} = \frac{\varepsilon_{v_1} - \varepsilon_{v_2}}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = \frac{\frac{V_1 - V_\circ}{V_\circ} - \frac{V_2 - V_\circ}{V_\circ}}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = \frac{\frac{V_1 - V_2}{V_\circ}}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = \frac{\frac{\Delta V}{V_\circ}}{\Delta\sigma'}$$

نکاتی مفید در ارتباط با رابطهٔ ضریب تغییر حجم:

۱) واحد m_v عکس واحد تنش است، زیرا:

$$m_v = \frac{\frac{\Delta V}{V_\circ}}{\Delta\sigma'}$$

کمیت بدون بعد ← $\frac{\Delta V}{V_\circ}$

۲) در تحکیم یک‌بعدی طبق آنچه قبلاً در آزمایش تحکیم گفته شد، $\frac{\Delta V}{V_\circ} = \frac{\Delta H}{H_\circ}$ است، بنابراین ضریب m_v برابر است با:

$$m_v = \frac{(\frac{\Delta H}{H_\circ})}{\Delta\sigma'}$$

۳) m_v نشان‌دهندهٔ **نرمی‌خاک رس** است، بنابراین عکس آن $(\frac{1}{m_v})$ نشان‌دهندهٔ سختی خاک رس بوده و به آن **مدول سختی** می‌گویند.

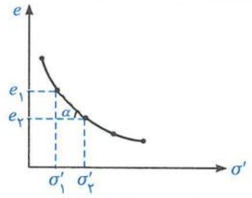
توجه کنید که در تحکیم یک‌بعدی به‌علت محصور شدن جانبی نمونه، به $\frac{1}{m_v}$ **مدول سختی محصور شدهٔ خاک رس** می‌گویند.

۴) ضریب m_v را می‌توان براساس رابطهٔ کلی تغییر شکل به‌صورت زیر نیز نوشت:

$$m_v = \frac{(\frac{\Delta V}{V_\circ})}{\Delta\sigma'} = \frac{\frac{\Delta e}{1+e_\circ}}{\Delta\sigma'} = \frac{1}{1+e_\circ}\,(\frac{\Delta e}{\Delta\sigma'})$$

در رابطهٔ بالا نسبت $\frac{\Delta e}{\Delta\sigma'}$ را **ضریب قابلیت فشردگی** نامیده و آن را با a_v نشان می‌دهند. پس اگر در رابطهٔ فوق به‌جای $\frac{\Delta e}{\Delta\sigma'}$ ضریب a_v را قرار دهید، در آن‌صورت ارتباط بین a_v و m_v به‌صورت زیر خواهد بود:

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_\circ}$$



۵ اگر نمودار نسبت تخلخل در برابر تنش مؤثر در فضای غیرلگاریتمی ترسیم شود، در آن‌صورت شیب مثبت نمودار در یک محدودهٔ بارگذاری مشخص نشان‌دهندهٔ ضریب a_v در آن محدوده خواهد بود.

$$a_v = tan\ \alpha = \frac{e_۱ - e_۲}{\sigma'_۲ - \sigma'_۱} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$$

۶ a_v و m_v در حین تحکیم ثابت نبوده و بستگی به محدودهٔ بارگذاری دارند، اما در عمل مقدار a_v و m_v برای یک نوع خاکِ مشخص، ثابت در نظر گرفته می‌شود. ما نیز در حل مسئله‌های این فصل، a_v و m_v را برای یک نوع خاک ثابت فرض می‌کنیم.

در ادامه با حل دو تمرین نسبتاً ساده کاربردهای پارامترهای a_v و m_v را خواهیم دید:

تمرین ۲۱: یک نمونه خاک رس اشباع به ضخامت اولیه ۲۰ mm تحت آزمایش تحکیم یک بعدی قرار گرفته و بار وارد بر نمونه در هر مرحله نسبت به مرحلهٔ قبل دو برابر می‌شود. جدول زیر بار وارد بر نمونه در هر مرحله و ضخامت نمونه در پایان آن مرحله را نشان می‌دهد.

$\sigma'(kPa)$	۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۸۰۰	۱۶۰۰
$H(mm)$	۲۰	۱۸/۸	۱۸/۲	۱۷/۴	۱۷	۱۶/۸

الف) ضریب تغییر حجم خاک در محدودهٔ بارگذاری بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال را به‌دست آورید.

ب) مدول سختی محصور شدهٔ متوسط خاک چند kPa است؟

● حل:

الف) چون در آزمایش تحکیم، حالت یک بعدی برقرار است، بنابراین m_v برابر است با:

$$m_v = \frac{(\frac{\Delta H}{H_۰})}{\Delta \sigma'} = \frac{(\frac{۱۸/۸ - ۱۷/۴}{۲۰})}{۴۰۰ - ۱۰۰} = ۰/۰۰۰۲۳\ (\frac{۱}{kPa})$$

ب) برای محاسبهٔ مدول سختی محصور شدهٔ متوسط خاک کافی است تا $\frac{۱}{m_v}$ را در محدوده ابتدا تا انتهای تحکیم به‌دست آوریم:

$$\frac{۱}{m_v} = \frac{\Delta \sigma'}{(\frac{\Delta H}{H_۰})} = \frac{۱۶۰۰ - ۰}{(\frac{۲۰ - ۱۶/۸}{۲۰})} = ۱۰۰۰۰\ kPa$$

تمرین ۲۲: در یک آزمایش ادومتری روی یک نمونه خاک رسی، ضریب تراکم‌پذیری $a_v = ۰/۰۱۵ \frac{۱}{kPa}$ به‌دست آمده است. اگر نسبت تخلخل اولیه خاک ۲ باشد، مقدار مدول سختی محصور شدهٔ این خاک چند کیلوپاسکال است؟ ($m_v = \frac{a_v}{۱ + e_۰}$) (سراسری - ۹۱)

۱) ۶۶ ۲) ۱۳۳ ۳) ۲۰۰ ۴) ۱۰۰

● حل: همانطورکه در تمرین قبل نیز ملاحظه شد، مدول سختی محصور شده برابر عکس ضریب m_v است، بنابراین برای پاسخ به این تست خواهیم داشت:

$$m_v = \frac{a_v}{۱ + e_۰} = \frac{۰/۰۱۵}{۱ + ۲} = ۰/۰۰۵ \frac{۱}{kPa} \Rightarrow \frac{۱}{m_v} = \frac{۱}{۰/۰۰۵} = ۲۰۰\ kPa$$

پس گزینه (۳) پاسخ صحیح این تست است.

حالا در ادامه به شما یاد می‌دهیم که چگونه می‌توان با استفاده از ضریب m_v، مقدار نشست تحکیم در یک لایهٔ رس را محاسبه کرد.

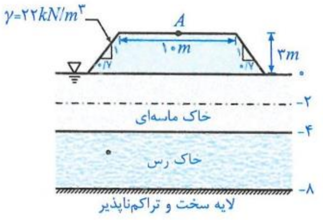
محاسبهٔ نشست تحکیم با استفاده از ضریب m_v

اگر مقدار ضریب m_v برای یک لایه خاک رس را بدانیم، در آن‌صورت به‌سادگی می‌توان نشست تحکیمی کل لایه را از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$m_v = \frac{(\frac{\Delta H}{H_۰})}{\Delta \sigma'} \Rightarrow \boxed{\Delta H = H_۰ m_v\ \Delta \sigma'}$$

جالب است بدانید که از مطلب سادهٔ فوق، تست‌های متنوعی در آزمون کارشناسی ارشد مطرح شده است. در ادامه با حل چند تست این موضوع را بیشتر بررسی می‌کنیم.

تمرین ۲۳: چنانچه سطح آب زیرزمینی در محل از تراز ۰/۰۰± به تراز ۲/۰۰ - متر کاهش یابد، تغییر مکان نقطهٔ A روی سطح خاکریز متراکم ناشی از نشست تحکیم لایه رس چند cm است؟ (سراسری - ۸۱)



مشخصات خاک ماسه: ($\gamma = 18\ kN/m^3$ ، $\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3$ و $\gamma_w = 10\ kN/m^3$)

مشخصات خاک رس: ($\gamma = 17\ kN/m^3$ ، $\gamma_{sat} = 19\ kN/m^3$ و $m_v = 5\times10^{-4} m^2/kN$)

۱) ۳/۲ ۲) ۴/۴
۳) ۵/۴ ۴) ۷/۵

● حل: ما در بخش ($A-2$) دیدیم که پایین آمدن سطح سفرهٔ آب زیرزمینی در لایهٔ بالای رس، باعث افزایش تنش مؤثر در لایهٔ رسی می‌شود که این افزایش تنش مؤثر باعث ایجاد نشست تحکیم در خاک رس اشباع خواهد شد. ابتدا بیایید مقدار افزایش تنش مؤثر را مشابه با تمرینی که در بخش ($A-2$) حل کردیم، محاسبه کنیم (عامل اختلاف دو حالت، تغییر وزن مخصوص مؤثر لایه بین تراز ۰/۰۰ تا ۲/۰۰ - است):

$$\Delta\sigma' = \Delta h\,(\gamma - \gamma') = 2\times(18-10) = 16\ kN/m^2$$

حالا با توجه به اینکه مقدار m_v در صورت سؤال داده شده است، مقدار نشست تحکیم را براساس این ضریب به‌سادگی محاسبه می‌کنیم:

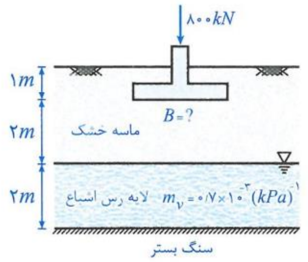
$$\Delta H = H_0\, m_v\, \Delta\sigma' = 4\times(5\times10^{-4})\times16 = 0/032\ m = 3/2\ cm$$

بنابراین گزینه (۱) صحیح است.

دقت

واحد $\Delta\sigma'$ را در محاسبات kN/m^2 (یا kPa) قرار داده‌ایم و واحد m_v، m^2/kN (یا $\frac{1}{kPa}$) داده شده است. با این عمل واحد ΔH با H_0 یکسان و برحسب متر است.

تمرین ۲۴: در شکل زیر حداقل بعد پی مربع چقدر باشد تا نشست تحکیمی از ۷ سانتی‌متر فراتر نرود؟ (از توزیع فشار تقریبی ۲ به ۱ استفاده کنید.) (سراسری - ۸۹)



۱) ۱ متر
۲) ۲ متر
۳) ۱/۵ متر
۴) ۲/۵ متر

● حل: در این تست بار وارد بر خاک به‌صورت گسترده و در یک سطح وسیع اعمال نشده است، بنابراین طبق مطالب گفته شدهٔ قبلی بایستی اضافه تنش ناشی از بارگذاری را در وسط لایه رسی محاسبه کنیم. برای این منظور طبق راهنمایی صورت سؤال، از روش تقریبی دو به یک استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)(L+z)} \xrightarrow[B=L]{\text{پی مربعی}} \Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)^2} = \frac{800}{(B+3)^2}\ kPa$$

در ادامه با توجه به مشخص بودن مقدار m_v در صورت سؤال، مشابه با تمرین قبلی مقدار ΔH را می‌یابیم و آن را طبق خواستهٔ صورت سؤال به $7\,cm$ محدود می‌کنیم تا B مینیمم به‌دست آید:

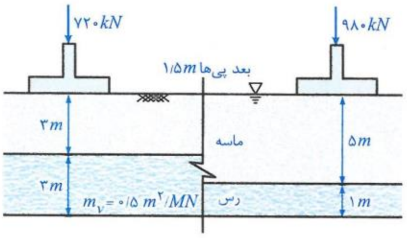
$$\Delta H = H_0\, m_v\, \Delta\sigma' \le 7\,cm \Rightarrow \underbrace{2}_{H_0\ \text{بر حسب متر}} \times(0/7\times10^{-3})\times\frac{800}{(B+3)^2} \le 0/07$$

$$\Rightarrow (B+3)^2 \ge 16 \xrightarrow{\text{جذر}} B+3 \ge 4 \Rightarrow B \ge 1\,m \Rightarrow B_{min} = 1\,m$$

بنابراین گزینه (۱) پاسخ صحیح این تست می‌باشد.

تذکر: در بعضی مواقع به علت یکسان نبودن ضخامت لایهٔ رس در زیر سازه (و شاید هم یکسان نبودن بقیه مشخصات خاک رس)، نشست در زیر دو پی مجاور، متفاوت بوده و نشست نامتقارن در سازه رخ می‌دهد. در این شرایط بایستی نشست خاک زیر هر پی را به‌صورت جداگانه محاسبه کرده و سپس تفاضل آنها را به‌دست آوریم تا اختلاف نشست (نشست نامتقارن) بین دو پی محاسبه شود. برای درک بهتر این موضوع به تمرین صفحهٔ بعد که در کنکور سراسری ۹۰ مطرح شده است، توجه کنید.

تمرین ۴۵: **اختلاف نشست تحکیمی دو پی مربعی به بعد ۱/۵ متر مطابق شکل، برحسب میلی‌متر چقدر است؟ (از توزیع فشار تقریبی ۲ به ۱ استفاده کنید.)** (سراسری - ۹۰)



۱) ۱۰
۲) ۲۰
۳) ۳۰
۴) ۴۰

پاسخ: طبق تذکر گفته شده نشست در زیر هر پی را مشابه با تمرین قبلی محاسبه کرده و تفاضل آنها را می‌یابیم:

مرحلهٔ اول: محاسبه نشست در زیر پی سمت چپ:

(B) عرض پی $= ۱/۵\ m$ و فاصلهٔ وسط خاک رس از کف پی $(z) = ۳ + \frac{۳}{۲} = ۴/۵\ m$

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)^۲} = \frac{۷۲۰}{(۱/۵ + ۴/۵)^۲} = ۲۰\ kN/m^۲$$

$$\Delta H = H_\circ m_v \Delta\sigma' = ۳ \times (۰/۵ \times ۱۰^{-۳}) \times ۲۰ = ۳۰ \times ۱۰^{-۳}\ m = ۳۰\ mm$$

تبدیل واحد از متر مربع بر مگانیوتن به متر مربع بر کیلونیوتن ($۱۰^{-۳}$)

مرحلهٔ دوم: محاسبهٔ نشست در زیر پی سمت راست:

(B) عرض پی $= ۱/۵\ m$ ، فاصلهٔ وسط خاک رس از کف پی $(z) = ۵ + \frac{۱}{۲} = ۵/۵\ m$

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)} = \frac{۹۸۰}{(۱/۵ + ۵/۵)^۲} = ۲۰\ kN/m^۲$$

$$\Delta H = H_\circ m_v \Delta\sigma' = ۱ \times (۰/۵ \times ۱۰^{-۳}) \times ۲۰ = ۱۰ \times ۱۰^{-۳}\ m = ۱۰\ mm$$

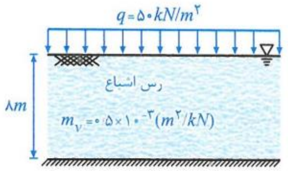
بنابراین اختلاف نشست تحکیمی دو پی برابر است با:

نامتقارن $\Delta H = ۳۰ - ۱۰ = ۲۰\ mm$

پس گزینهٔ (۲) صحیح است.

D-۱- آشنایی با مفهوم درجهٔ تحکیم متوسط

به شکل زیر توجه کنید که در آن یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۸ متر تحت بار گستردهٔ یکنواختی به شدت $q = 50\, kN/m^2$ قرار گرفته است. بعد از گذشت یک زمان طولانی، میزان نشست تحکیمی نهایی لایهٔ رسی برابر مقدار زیر است:



$$\Delta H = H_\circ\, m_v\, \Delta\sigma' = 8 \times (0.5 \times 10^{-3}) \times 50 = 0.2\, m = 20\, cm$$

حال فرض کنید که پس از گذشت ۲ سال، ۵ سانتی‌متر از نشست فوق اتفاق افتاده است. در این شرایط می‌توان گفت ۲۵ درصد از کل نشست رخ داده است ($\frac{5}{20} \times 100 = 25\%$) و اصطلاحاً گفته می‌شود که در این لحظه **درجهٔ تحکیم متوسط** لایهٔ رسی ۰/۲۵ یا ٪ ۲۵ است. احتمالاً متوجه شده‌اید که اگر پس از گذشت زمان t، نشست ΔH_t در خاک رخ دهد و نشست تحکیم نهایی خاک نیز برابر ΔH_∞ (∞ یعنی زمان طولانی) باشد، در آن‌صورت درجهٔ تحکیم متوسط لایه در این لحظه برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

در ادامه با چند تذکر در همین مورد بحث را ادامه می‌دهیم.

تذکر ۱: U نشان‌دهندهٔ پیشرفت تحکیم است، بنابراین در ابتدای تحکیم که هیچ نشستی رخ نداده، $U = 0$ می‌باشد. در انتهای تحکیم نیز که کل نشست تحکیمی رخ داده است، $U = 100\%$ خواهد بود.

تذکر ۲: تغییرات U با زمان خطی نیست، یعنی در مثال بالا نمی‌توانیم بگوییم که چون بعد از ۲ سال، $5\,cm$ نشست رخ داده است، بنابراین پس از ۴ سال $10\,cm$ از نشست اتفاق می‌افتد.

تذکر ۳: طبق رابطهٔ کلی تغییر شکل که بارها در این فصل با آن مواجه شدیم، می‌توان مشاهده کرد که تغییرات نسبت تخلخل (Δe) و نشست (ΔH) با یکدیگر متناسب‌اند:

$$\Delta H = \underbrace{\frac{H_\circ}{1+e_\circ}}_{\text{ثابت}} \Delta e \Rightarrow \Delta H \propto \Delta e \quad \text{یا} \quad \Delta e \propto \Delta H$$

با توجه به مطلب فوق می‌توان دو نتیجهٔ مهم زیر را برداشت کرد:

۱) با استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل می‌توان میزان نشست تحکیم در هر لحظهٔ دلخواه را به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\frac{\Delta H_t}{H_\circ} = \frac{\Delta e_t}{1+e_\circ} \Rightarrow \Delta H_t = H_\circ \left(\frac{e_\circ - e_t}{1+e_\circ}\right)$$

۲) درجه تحکیم متوسط لایه رسی را می‌توان با استفاده از تغییرات نسبت تخلخل خاک نیز به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{\Delta e_t}{\Delta e_\infty} \Rightarrow U = \frac{e_\circ - e_t}{e_\circ - e_f}$$

در ادامه با یک تمرین نسبتاً ساده، مطالب گفته شده را مرور می‌کنیم.

زیر شاخه‌های قسمت چهارم

D-۱- آشنایی با مفهوم درجهٔ تحکیم متوسط

D-۲- آشنایی با مفهوم درجهٔ تحکیم نقطه‌ای

D-۳- محاسبهٔ درجهٔ تحکیم متوسط با استفاده از نمودار توزیع فشار آب حفره‌ای در لایهٔ خاک

تمرین ۳۶: یک خاک رس اشباع با نسبت تخلخل اولیه $e_\circ = 1$ در اثر نوعی بارگذاری دچار تحکیم می‌شود و در دراز مدت $20cm$ نشست می‌کند. اگر نسبت تخلخل خاک در انتهای تحکیم $e_f = 0/8$ باشد، نشست خاک وقتی درصد رطوبت خاک برابر ۳۶ درصد است، چند cm می‌باشد؟ $(G_S = 2/5)$

۱) ۱۰ ۲) ۱۲/۵ ۳) ۱۵ ۴) ۱۷/۵

حل: ابتدا نسبت تخلخل خاک در رطوبت ۳۶ درصد را می‌یابیم:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow 0/36 \times 2/5 = 1 \times e_t \Rightarrow e_t = 0/9$$

سپس درجهٔ تحکیم متناظر با آن را به‌دست می‌آوریم:

$$U = \frac{e_\circ - e_t}{e_\circ - e_f} = \frac{1-0/9}{1-0/8} = 0/5 \text{ یا } 50\%$$

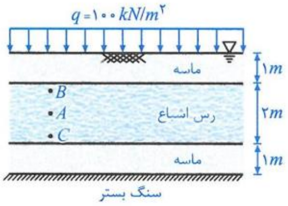
و در نهایت نشست خاک در این لحظه برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow 0/5 = \frac{\Delta H_t}{20} \Rightarrow \Delta H_t = 10cm$$

بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح این تست است.

D-۲- آشنایی با مفهوم درجهٔ تحکیم نقطه‌ای

ما در ابتدای این بخش، می‌خواهیم یکبار دیگر به مطالب ابتدای فصل برگشته و مجدداً آنها را مرور کنیم. برای این منظور به سراغ شکل سؤال (۲) در بخش $(A-1)$ می‌رویم:



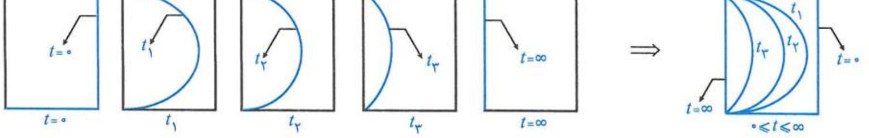
همانطور که در آنجا دیدیم، نقاط B و C به‌علت نزدیکی به مرزهای زهکش (ماسه) سریعاً اضافه فشار آب حفره‌ای خود را صفر کرده و زهکشی می‌شوند، این در حالی است که در نقطهٔ A که دور از مرزهای زهکشی است، اضافه فشار آب حفره‌ای دیرتر مستهلک شده و سرعت تحکیم پایین‌تر است. از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که:

۱) سرعت تحکیم (پیشرفت تحکیم) در نقاط مختلف لایه یکسان نبوده و متفاوت است.

۲) درجهٔ تحکیم متوسط که در بخش قبلی آن را یاد گرفتیم، نشان‌دهندهٔ پیشرفت تحکیم در کل لایه است و نمی‌تواند پیشرفت تحکیم در یک نقطه را به‌صورت اختصاصی نشان دهد.

۳) برای اینکه بتوانیم پیشرفت تحکیم در یک نقطه را نشان دهیم، باید یک درجهٔ تحکیم اختصاصی برای نقطهٔ موردنظر داشته باشیم.

حال بیایید در ادامه دوباره پروفیل شکل بالا را در نظر بگیریم. همانطور که می‌دانید بلافاصله بعد از اعمال بار q، فشار آب حفره‌ای در تمام نقاط لایه رسی به اندازهٔ بار وارده افزایش می‌یابد و با گذشت زمان این اضافه فشار آب حفره‌ای در نقاط مختلف با سرعت‌های متفاوت مستهلک می‌شود. شکل‌های زیر توزیع اضافه فشار آب حفره‌ای در لحظات مختلف را برای لایهٔ رسی موردنظر ما نشان داده است:



حال می‌خواهیم با کمک این منحنی‌ها و بررسی چند سؤال به نتایج جالبی برسیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: به‌نظر شما در یک نقطه چه کمیتی را می‌توان به‌عنوان نمایندهٔ سرعت تحکیم در آن نقطه به حساب آورد؟

پاسخ: همانطور که می‌دانیم هرچه در یک نقطه فشار آب حفره‌ای اضافی بیشتر محو شود، تحکیم پیشرفت بیشتری داشته است. بنابراین مقدار Δu **محو شده** را می‌توان نمایندهٔ خوبی برای پیشرفت تحکیم در یک نقطه دانست.

سؤال ۲: فرض کنید در لحظهٔ مشخص t در یک نقطه از لایهٔ رسی، از ۱۰۰ کیلوپاسکال اضافه فشار آب حفره‌ای اولیه، ۴۰ کیلوپاسکال آن مستهلک شده باشد (یعنی Δu محو شده برابر ۴۰ کیلوپاسکال باشد). به نظر شما چند درصد تحکیم در این لحظه در این نقطه رخ داده است؟

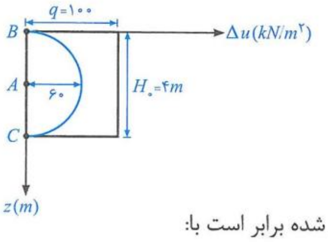
پاسخ: با توجه به اینکه ۴۰ درصد از اضافه فشار آب حفره‌ایِ این نقطه محو شده است ($\frac{۴۰}{۱۰۰}\times ۱۰۰ = ۴۰٪$) می‌توان گفت در این نقطه ۴۰ درصد از تحکیم اتفاق افتاده است، یعنی درجه تحکیم این نقطه ۰/۴ یا ۴۰٪ است.

نتیجه: درجهٔ تحکیم در یک نقطه از لایهٔ رسی که به فاصلهٔ z از سطح آن قرار گرفته است، (درجهٔ تحکیم نقطه‌ای) از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$U_z = \frac{\text{محو شده } \Delta u_z}{\Delta u_۰}$$

که در رابطهٔ بالا $\Delta u_۰$ کل اضافه فشار آب حفره‌ای اولیه بوده و با q برابر است.

سؤال ۳: فرض کنید در لحظهٔ مشخص t ، منحنی توزیع اضافه فشار آب حفره‌ای در لایهٔ رسیِ مورد نظر به‌صورت زیر است. درجه تحکیم نقاط A و B و C چقدر است؟



پاسخ: در نقاط $B\,(z=۰)$ و $C\,(z=۴\,m)$ Δu از ۱۰۰ به صفر رسیده است، بنابراین Δu محو شده برابر است با:

Δu محور شده $=$ اولیه $\Delta u -$ موجود $\Delta u = ۱۰۰ - ۰ = ۱۰۰\ kN/m^۲$

پس درجهٔ تحکیم این دو نقطه برابر خواهد بود با:

$$U_z = \frac{\text{محو شده } \Delta u_z}{\Delta u_۰} = \frac{۱۰۰}{۱۰۰} = ۱ = ۱۰۰٪$$

اما برای نقطهٔ A که در وسط لایهٔ رسی قرار دارد، خواهیم داشت:

Δu محو شده $=$ اولیه $\Delta u -$ موجود $\Delta u = ۱۰۰ - ۶۰ = ۴۰\ kN/m^۲$

$$U_z = \frac{\text{محو شده } \Delta u_z}{\Delta u_۰} = \frac{۴۰}{۱۰۰} = ۰/۴ = ۴۰٪$$

نتایج:

۱) همانطور که مشاهده کردید بیشترین درجهٔ تحکیم در مرزهای زهکشی لایه رسی رخ داده و کمترین درجهٔ تحکیم نیز در نقطه‌ای مانند B اتفاق می‌افتد که بیشترین فاصله را از مرزهای زهکشی دارد.

۲) برای تعیین درجهٔ تحکیم نقطه‌ای می‌توان از رابطهٔ زیر که براساس Δu موجود در نقطهٔ مورد‌نظر است، استفاده کرد:

$$U_z = \frac{\text{محو شده } \Delta u_z}{\Delta u_۰} = \frac{\text{اولیه } \Delta u - \text{موجود } \Delta u_z}{\Delta u_۰} = \frac{\Delta u_۰ - \text{موجود } \Delta u_z}{\Delta u_۰} = ۱ - \frac{\text{موجود } \Delta u_z}{\Delta u_۰}$$

با توجه به اینکه $\Delta u_۰ = q$ است، رابطهٔ بالا در نهایت به فرم مقابل در می‌آید:

$$U_z = ۱ - \frac{\text{موجود } \Delta u_z}{q}$$

سؤال ۴: Δu محو شده به کجا می‌رود و به چه چیزی تبدیل می‌شود؟

پاسخ: Δu محو شده، فشاری است که قبلاً آب تحمل می‌کرده و اکنون به دانه‌های جامد منتقل شده است، پس می‌توان گفت Δu محو شده به اضافه تنش مؤثر تبدیل می‌شود.

نتیجه:

۱) سهم آب و دانه‌های جامد (فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر) از بار q در لحظات مختلف تحکیم به‌صورت زیر است:

سهم آب و دانه‌های جامد از بار	وضعیت پیشروی تحکیم	زمان
$q = \Delta u_0$	شروع تحکیم	$t = 0$
$q = \Delta u_t + \Delta\sigma'_t$	حین تحکیم	$0 < t < \infty$
$q = \Delta\sigma'_\infty$	خاتمهٔ تحکیم	$t = \infty$

۲) درجهٔ تحکیم نقطه‌ای را می‌توان براساس $\Delta\sigma'$ موجود در نقطهٔ موردنظر نیز به‌دست آورد که رابطهٔ آن به‌صورت زیر است:

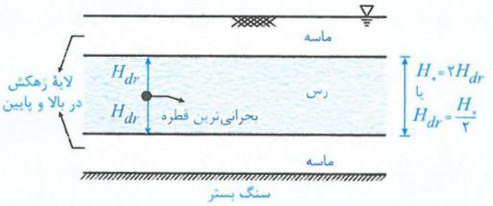
$$U_z = \frac{\Delta u_z \text{ محو شده}}{\Delta u_0} \xrightarrow[\Delta u_0 = q]{\Delta\sigma'_z \text{ موجود} = \Delta u_z \text{ محو شده}} U_z = \frac{\Delta\sigma'_z \text{ موجود}}{q}$$

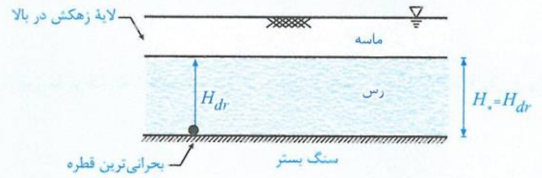
۳) فرض کنید $q = 100\, kN/m^2$ باشد و در یک نقطه از خاک رس در یک لحظه درصد تحکیم ۴۰٪ باشد. این موضوع یعنی ۴۰ درصد از q به اضافه تنش مؤثر ($\Delta\sigma'$) تبدیل شده و مابقی به‌صورت اضافه فشار آب حفره‌ای (Δu) است.

$$q = 100\, kN/m^2 \xrightarrow{U_z = 40\% \text{ یا } 0/4} \begin{cases} \Delta\sigma' = 0/4 \times q = 40\, kN/m^2 \\ \Delta u = 0/6 \times q = 60\, kN/m^2 \end{cases}$$

یک نکته بسیار مهم

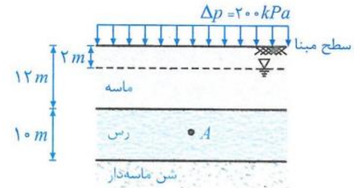
اگر امکان خروج آب از لایهٔ رسی فراهم باشد (وجود لایهٔ زهکش، هوا یا به‌طور کلی مرز نفوذپذیر در اطراف رس)، در آن‌صورت در اثر بارگذاری و با گذشت زمان خاک رس زهکشی می‌شود و نشست تحکیم رخ می‌دهد. زهکشی می‌تواند از دو طرف یعنی بالا و پایین رس اتفاق بیافتد که به آن **زهکشی دوطرفه** می‌گوییم. همچنین زهکشی ممکن است فقط از یک طرف رخ دهد که در آن‌صورت **زهکشی یک‌طرفه** نامیده می‌شود. به‌هنگام زهکشی لایهٔ رس با پارامتر مهمی به‌نام **حداکثر مسافت زهکشی** سر و کار داریم که آن را با H_{dr} نشان می‌دهیم و عبارت است از مسافتی که بحرانی‌ترین قطرهٔ یک لایه (قطره‌ای که از همه به مرزهای نفوذپذیر دورتر است) بایستی طی کند تا Δu خود را صفر کند. شکل‌های زیر پارامتر H_{dr} را در زهکشی‌های دوطرفه و یک‌طرفه نشان می‌دهند:





تمرین ۴۷: **درجه تحکیم در وسط لایهٔ خاک رس اشباع در شکل مقابل ۶۰٪ است. اگر یک پیزومتر در این نقطه قرار گیرد تراز آب در پیزومتر نسبت به سطح مبنا چقدر خواهد بود؟** ($\gamma_w = 10\, kN/m^3$)

(سراسری - ۸۷)



۱) $6m$
۲) $8m$
۳) $10m$
۴) $12m$

حل: ابتدا Δu را با کمک رابطهٔ درجهٔ تحکیم در نقطهٔ A محاسبه می‌کنیم:

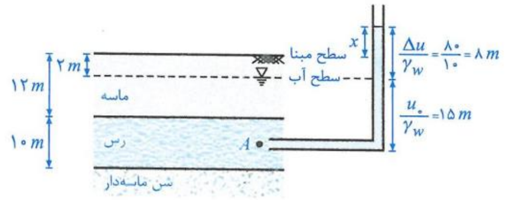
$$U_{z(A)} = 1 - \frac{\Delta u_{z(A)} \text{ موجود}}{q} \Rightarrow 0/6 = 1 - \frac{\Delta u_{z(A)} \text{ موجود}}{200} \Rightarrow \Delta u_{z(A)} \text{ موجود} = 80\, kPa$$

کمی خلاقیت

وقتی درجهٔ تحکیم ۶۰ درصد است، یعنی از کل بار وارده، ۶۰ درصد سهم دانه‌ها و ۴۰ درصد سهم آب است.

$$\Delta\sigma' = 0/6 \times 200 = 120\, kPa \quad , \quad \Delta u = 0/4 \times 200 = 80\, kPa$$

حال اگر یک پیزومتر در نقطهٔ A قرار دهیم، در آن‌صورت وضعیت تراز آب در آن (در لحظهٔ موردنظر) به‌صورت زیر خواهد بود:

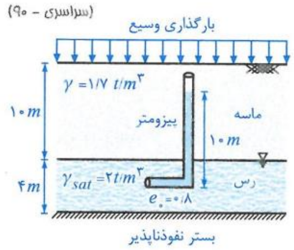


اما دقت کنید که فاصلهٔ تراز آب در پیزومتر نسبت به سطح مبنا خواسته شده است و مقدار آن برابر است با:

$$x = 8 - 2 = 6\,m$$

یعنی گزینه (۱) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۲۸: در اثر بارگذاری وسیع روی سطح خاک، ارتفاع آب در پیزومتر در مرکز یک لایه رس مطابق شکل به ۱۰ متر می‌رسد که پس از ۳ سال سطح زمین ۴۰ سانتی‌متر نشست کرده و ارتفاع آب در پیزومتر به ۴ متر می‌رسد. نشانه خلاء و تنش مؤثر متناظر در این زمان در مرکز لایه به ترتیب چقدر خواهند بود؟ (سراسری - ۹۰)



۱) ۰/۱۸ و $25\,t/m^2$
۲) ۰/۶۲ و $23\,t/m^2$
۳) ۰/۶۲ و $25\,t/m^2$
۴) ۰/۱۸ و $23\,t/m^2$

● حل: همانطور که می‌دانیم، اضافه فشار آب حفره‌ای محو شده در این سه سال به اضافه تنش مؤثر در وسط لایهٔ رسی تبدیل شده است، بنابراین تنش مؤثر موجود در وسط لایهٔ رسی در این لحظه برابر است با:

$$\begin{cases} \sigma'_z = \text{اولیه } \sigma'_z + \text{موجود } \Delta\sigma'_z \\ \text{اولیه } \sigma'_z = 1/7 \times 10 + (2-1) \times 2 = 19\ t/m^2 \\ \text{موجود } \Delta\sigma' = \text{محو شده } \Delta u_z = \text{محو شده } \Delta h_z \times \gamma_w = (10-4) \times 1 = 6\ t/m^2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma'_z = 19 + 6 = 25\ t/m^2 \ \text{(تنش مؤثر متناظر در این زمان)}$$

در ادامه نیز با توجه به اطلاعات صورت سؤال، مقدار نشانهٔ خلاء لایهٔ رسی را در زمان مورد نظر می‌یابیم:

$$\frac{\Delta H_t}{H_0} = \left(\frac{e_0 - e_t}{1 + e_0}\right) \Rightarrow \frac{0/4}{4} = \frac{0/8 - e_t}{1 + 0/8} \Rightarrow e_t = 0/62$$

پس گزینه (۳) صحیح است.

D-۳- محاسبهٔ درجهٔ تحکیم متوسط با استفاده از نمودار توزیع فشار آب حفره‌ای در لایهٔ خاک

در دو بخش قبلی این قسمت دیدیم که درجهٔ تحکیم متوسط لایه و درجهٔ تحکیم در یک نقطه را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد:

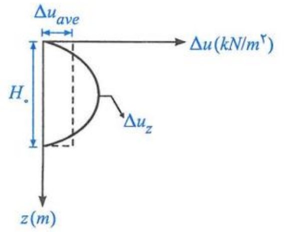
$$\begin{cases} U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{\Delta e_t}{\Delta e_\infty} \ \text{(درجه تحکیم متوسط)} \\ U_z = \frac{\text{محو شده } \Delta u_z}{q} = \frac{\text{موجود } \Delta\sigma'_z}{q} = 1 - \frac{\text{موجود } \Delta u_z}{q} \ \text{(درجهٔ تحکیم نقطه‌ای)} \end{cases}$$

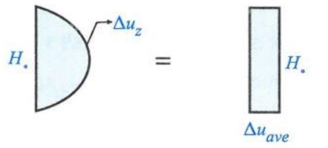
حال این سؤال در ذهن ما ایجاد می‌شود که آیا می‌توان براساس اضافه فشار آب حفره‌ای هم درجهٔ تحکیم متوسط لایهٔ رسی را محاسبه کرد؟ در جواب باید گفت اگر بتوانیم یک مقدار میانگین برای اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در خاک (که به آن اضافه فشار آب حفره‌ای متوسط کل لایه یا Δu_{ave} می‌گوییم) بیابیم، در آن‌صورت به‌سادگی با کمک رابطهٔ زیر، درجه تحکیم متوسط برای کل لایه محاسبه می‌شود:

$$U = 1 - \frac{\Delta u_{ave}}{q}$$

نکات تکمیلی در رابطه با درجه تحکیم متوسط

۱) اگر معادلهٔ تغییرات Δu در لایهٔ رسی را در زمان مورد نظر داشتیم، برای محاسبه Δu متوسط در این زمان، باید مطابق مفاهیم ریاضی عمل کرده و قسمت خط‌چین را با میانگین‌گیری جایگزین منحنی توپر کنیم. برای این منظور لازم است تا مساحت زیر آنها را با هم برابر باشد:





$S_1=\int_0^{H_0}\Delta u_z dz$ (مساحت منحنی)

$S_2=\Delta u_{ave}\times H_0$ (مساحت مستطیل)

$$S_1=S_2 \Rightarrow \int_0^{H_0}\Delta u_z\,dz=\Delta u_{ave}\times H_0 \Rightarrow \boxed{\Delta u_{ave}=\frac{\int_0^{H_0}\Delta u_z\,dz}{H_0}}$$

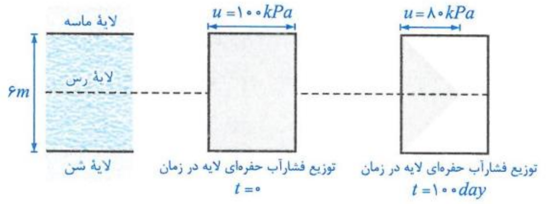
۲) گاهی‌اوقات ممکن است در سؤالات و تست‌ها، نمودار Δu_z به‌صورت یک شکل هندسی ساده (مانند مثلث، نیم‌بیضی و ...) تقریب زده شود. واضح است که در این حالت به‌جای محاسبهٔ $\int_0^{H_0}\Delta u_z\,dz$ ، کافی است تا مساحت شکل هندسی موردنظر را به‌دست آوریم.

۳) مقدار درجه تحکیم متوسط لایهٔ رسی را می‌توان براساس تنش موثر متوسط در کل لایه نیز به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$U=1-\frac{\Delta u_{ave}}{q}=\frac{q-\Delta u_{ave}}{q}=\frac{\Delta\sigma'_{ave}}{q} \Rightarrow \boxed{U=\frac{\Delta\sigma'_{ave}}{q}}$$

تمرین ۴۹: توزیع اضافه فشار آب حفره‌ای یک لایهٔ رس در شروع تحکیم و صد روز پس از آغاز تحکیم مطابق شکل زیر است. پیشرفت تحکیم در روز صدم چند درصد است؟ (سراسری - ۹۱)

۱) ۲۰
۲) ۴۰
۳) ۸۰
۴) ۶۰



● حل: برای محاسبهٔ پیشرفت تحکیم در لایهٔ رسی یا همان درجهٔ تحکیم متوسط لایه، ابتدا Δu_{ave} را می‌یابیم:

$$\Delta u_{ave}=\frac{\int_0^{H}\Delta u_z\,dz}{H_0}=\frac{\text{مساحت مثلث}}{\text{ضخامت لایه}}=\frac{\left(\frac{80\times 6}{2}\right)}{6}=40\,kPa$$

و در ادامه مقدار درجهٔ تحکیم متوسط لایه برابر است با:

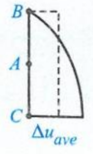
$$U=1-\frac{\Delta u_{ave}}{q}=1-\frac{\Delta u_{ave}}{\Delta u_0}=1-\frac{40}{100}=0/6 \text{ یا } 60\%$$

پس گزینهٔ (۴) پاسخ صحیح است.

بررسی یک مفهوم بسیار پرکاربرد در کنکور

علاوه بر بحث محاسبه Δu_{ave}، موضوع مقایسه Δu_{ave} با Δu در نقاط مختلف لایهٔ رسی (به‌خصوص وسط لایه) هم از مباحث مورد توجه در کنکور است. ما با استفاده از مطالبی که در این قسمت به شما یاد دادیم، این مقایسه را برای لایه‌های رسی با زهکشی‌های یک‌طرفه و دوطرفه انجام می‌دهیم:

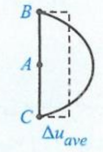
زهکشی یک‌طرفه



$\Delta u_{ave}>\Delta u_B$

$\Delta u_{ave}<\Delta u_A \;,\; \Delta u_C$

زهکشی دوطرفه



$\Delta u_{ave}>\Delta u_B \;,\; \Delta u_C$

$\Delta u_{ave}<\Delta u_A$

توجه کنید که برای مقایسه مقادیر مربوط به اضافه تنش مؤثر عکس روابط گفته شده برقرار است، یعنی اگر $\Delta u > \Delta u_{ave}$ باشد، در این‌صورت $\Delta\sigma' < \Delta\sigma'_{ave}$ است و بالعکس.

$$\Delta u_{ave} + \Delta\sigma'_{ave} = \Delta u + \Delta\sigma' \Rightarrow \begin{cases} \Delta u > \Delta u_{ave} \Rightarrow \Delta\sigma' < \Delta\sigma'_{ave} \\ \Delta u < \Delta u_{ave} \Rightarrow \Delta\sigma' > \Delta\sigma'_{ave} \end{cases}$$

تمرین ۳۰: لایه رس اشباعی به ضخامت ۵ متر از بالا و پایین در مجاورت لایه‌های نفوذپذیر قرارگرفته است. تحت تأثیر بارگذاری برروی سطح زمین تنش کل در وسط لایه رس (عمق ۲/۵ متری لایه رس) به میزان $۵۰\,kN/m^۲$ افزایش می‌یابد. در لحظه‌ای که ٪۵۰ نشست تحکیمی متوسط لایه انجام شده است، در اثر بارگذاری فوق:

الف) اضافه تنش موثر در وسط لایه رسی برحسب $kN/m^۲$ چه مقدار است؟ (سراسری - ۸۵)

ب) فشار آب حفره‌ای اضافی در وسط لایه رسی برحسب $kN/m^۲$ چقدر است؟

۱) کمتر از ۲۵
۲) برابر ۲۵
۳) بیشتر از ۲۵
۴) افزایش تنش مؤثر برابر با افزایش فشار آب حفره‌ای است.

● حل: با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال می‌دانیم که مقدار بار q که باعث افزایش تنش کل (مجموع Δu و $\Delta\sigma'$) در لایهٔ رسی شده است برابر $۵۰\,kN/m^۲$ است، در ضمن درجه تحکیم متوسط لایه نیز برابر ٪۵۰ می‌باشد. پس می‌توان گفت:

الف)

$$U = \frac{\Delta\sigma'_{ave}}{q} \Rightarrow ۰/۵ = \frac{\Delta\sigma'_{ave}}{۵۰} \Rightarrow \Delta\sigma'_{ave} = ۲۵\,kN/m^۲ \Rightarrow \Delta\sigma'_{وسط} < \Delta\sigma'_{ave} = ۲۵ \Rightarrow$$ گزینه (۱) درست است.

ب)

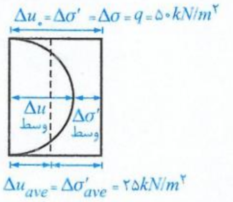
$$U = ۱ - \frac{\Delta u_{ave}}{q} \Rightarrow ۰/۵ = ۱ - \frac{\Delta u_{ave}}{۵۰} \Rightarrow \Delta u_{ave} = ۲۵\,kN/m^۲ \Rightarrow \Delta u_{وسط} > \Delta u_{ave} = ۲۵ \Rightarrow$$ گزینه (۳) صحیح است.

درک بهتر

برای درک بهتر شما عزیزان، مقادیر مربوط به اضافه فشار آب حفره‌ای و اضافه تنش مؤثر در این سؤال را در نمودار شکل مقابل نشان داده‌ایم و همانطور که مشاهده می‌کنید:

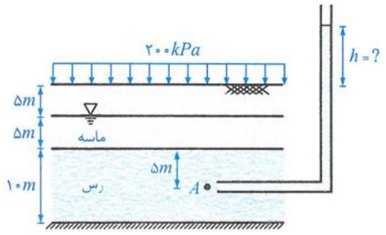
$\Delta u_{وسط} > \Delta u_{ave} = ۲۵\,kN/m^۲$

$\Delta\sigma'_{وسط} < \Delta\sigma'_{ave} = ۲۵\,kN/m^۲$



تمرین ۳۱: در اثر اجرای یک خاکریز در سطح وسیع، بار گسترده $۲۰۰\,kN/m^۲$ مطابق شکل بر سطح خاک اعمال شده و نشست تحکیم نهایی لایهٔ رسی برابر $۳۰cm$ محاسبه شده است. در زمانی‌که نشست این لایه برابر $۱۵cm$ گزارش شده است، سطح آب در پیزومتری که در نقطهٔ A قرار دارد ....

۱) دقیقاً روی سطح زمین است.
۲) بیشتر از ۵ متر بالاتر از سطح زمین است.
۳) ۵ متر بالاتر از سطح زمین است.
۴) کمتر از ۵ متر بالاتر از سطح زمین است.



● حل: ابتدا درجهٔ تحکیم متوسط لایه را می‌یابیم:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{۱۵}{۳۰} = ۰/۵ = ۵۰\,\%$$

و در ادامه Δu_{ave} را محاسبه می‌کنیم:

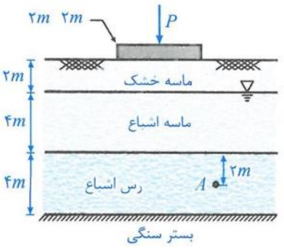
$$U = ۱ - \frac{\Delta u_{ave}}{q} \Rightarrow ۰/۵ = ۱ - \frac{\Delta u_{ave}}{۲۰۰} \Rightarrow \Delta u_{ave} = ۱۰۰\,kPa$$

پس در مورد اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطهٔ A (وسط لایهٔ رس) می‌توان گفت:

$$\Delta u_{z(A)} > \Delta u_{ave} = ۱۰۰\,kPa \Rightarrow \Delta h_{P(A)} > \frac{\Delta u_{ave}}{\gamma_w} = \frac{۱۰۰}{۱۰} = ۱۰\,m$$

یعنی سطح آب در پیزومتر در این لحظه بیشتر از ۱۰ متر بالاتر از سطح سفرهٔ آب زمینی و بیشتر از ۵ متر بالاتر از سطح زمین قرار دارد و گزینه (۲) جواب درست است.

تمرین ۳۲: مطابق شکل زیر، در اثر اعمال سریع بار P بر یک پی مربعی (بعد $2m$)، تنش کل در نقطهٔ A افزایش می‌یابد. پس از گذشت ۶ ماه ارتفاع آب در پیزومتری که در نقطهٔ A قرار دارد، به اندازهٔ $1/5\,m$ افت می‌کند. اگر تحکیم نهایی لایهٔ رسی در زیر پی برابر $10cm$ بوده و پس از ۶ ماه (زمان مورد نظر) مقدار نشست لایه $4cm$ باشد، در آن‌صورت مقدار P برحسب کیلونیوتن چقدر است؟ (از توزیع تنش تقریبی ۲ به ۱ استفاده کنید و $\gamma_w = 10\,kN/m^3$)



۱) کمتر از ۲۵۰۰
۲) بیشتر از ۳۷۵۰
۳) کمتر از ۳۷۵۰
۴) بیشتر از ۲۵۰۰

حل: ابتدا با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱، مقدار اضافه تنش وارده در مرکز لایهٔ رسی (نقطهٔ A) را می‌یابیم. توجه کنید که در این حالت Δu_0 برابر $\Delta\sigma_z$ است.

$$\Delta\sigma_z = \frac{P}{(B+z)^2} = \frac{P}{(2+8)^2} = \frac{P}{100}\,kN/m^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta u_0 = \frac{P}{100}\,kN/m^2$$

سپس درجهٔ تحکیم متوسط لایه و درجه تحکیم در نقطهٔ A را نیز به‌دست می‌آوریم:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{4}{10} = 0/4 \text{ یا } 40\%$$

$$U_{z(A)} = \frac{\Delta u_{z(A)} \text{ محو شده}}{\Delta u_0} = \frac{1/5\times 10}{\left(\frac{P}{100}\right)} = \frac{1500}{P}\,kN/m^2$$

و نهایت با توجه به اینکه اضافه فشار آب حفره‌ای در مرکز لایهٔ رسی بیشتر از اضافه فشار آب حفره‌ای متوسط کل لایه است، می‌توان نتیجه گرفت که درجه تحکیم وسط لایه کمتر از درجهٔ تحکیم متوسط کل لایه است. بنابراین می‌نویسیم:

$$U_{z(A)} < U \quad \Rightarrow \quad \frac{1500}{P} < 0/4 \quad \Rightarrow \quad P > 3750\,kN$$

یعنی گزینه (۲) درست است.

قسمت پنجم (E): نشست در حین تحکیم و آشنایی با پارامترهای سرعت تحکیم

E-۱- محاسبهٔ نشست در حین تحکیم

فرض کنید نشست تحکیمی نهایی یک لایهٔ رس اشباع به ضخامت مشخص، ظرف مدت ۱۰ سال اتفاق بیافتد و مقدار آن ۲۰ سانتیمتر باشد. اگر از ما بپرسند که مثلاً بعد از یک سال، نشست تحکیمی خاک رس چند سانتی‌متر است، باید گام‌های زیر را طی کنیم:

۱) ابتدا پارامتری به‌نام ضریب تحکیم (C_v) را که نشان‌دهندهٔ سرعت تحکیم است و به جنس خاک بستگی دارد، به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$$

در رابطهٔ بالا k نشان‌دهندهٔ نفوذپذیری خاک است و m_v ضریب تغییر حجم خاک رس می‌باشد.

۲) در ادامه حداکثر مسافت زهکشی لایهٔ رسی (H_{dr}) را که در قسمت قبل با آن آشنا شدیم، تعیین می‌کنیم و سپس با استفاده از آن پارامتر بدون بعد عامل زمان (T_v) را به‌صورت زیر به‌دست آوریم:

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^{۲}}$$

در رابطهٔ بالا، t مدت زمان گذشته از شروع تحکیم است.

۳) پس از محاسبهٔ T_v، با کمک روابط زیر مقدار درجهٔ تحکیم متوسط (U) را می‌یابیم:

$$\begin{cases} T_v = \frac{\pi}{۴} U^{۲} & (U < ۶۰\%) \\ T_v = -۰/۹۳۳ \log(۱-U) - ۰/۰۸۵ & (U \geq ۶۰\%) \end{cases}$$

لازم به ذکر است که علاوه بر روابط بالا، ارتباط بین T_v و U را می‌توان با کمک نمودارها یا جدول‌هایی که ارائه می‌شود نیز تعیین کرد.

۴) در نهایت نیز نشست خاک را در لحظهٔ مورد نظر، از حاصل‌ضرب درجه تحکیم متوسط (U) در مقدار نشست تحکیم نهایی (ΔH_∞) به‌دست می‌آوریم.

$$\Delta H_t = U \times \Delta H_\infty$$

در ادامه با بررسی دو تمرین، این بحث را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۳۳: یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۱۰ متر بر روی یک لایه خاک درشت‌دانه قرار گرفته است. ضریب تحکیم C_v برای خاک رس، $5 \times 10^{+3}$ (سال/cm^2) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. درصد تحکیم در وسط لایهٔ رسی بعد از ۵ سال، کدام است؟ (سراسری - ۹۲)

T_v	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵
U_z در وسط لایه رس	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۴	۰/۵۲	۰/۶۳

۱) ۶ ۲) ۲۱ ۳) ۵۲ ۴) ۴۷

● حل: مطابق با اطلاعات داده شده در صورت سؤال، شکل پروفیل خاک به‌صورت زیر خواهد بود:

$$H_{dr} = \frac{H_0}{۲} = ۵ \ m$$

در ادامه با محاسبهٔ T_v خواهیم داشت:

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^{۲}} = \frac{(۵ \times ۱۰^{۳})(۵)}{(۵ \times \boxed{۱۰۰})^{۲}} = ۰/۱ \xrightarrow{\text{جدول}} U_z = ۰/۰۶ = ۶\%$$

تبدیل متر به سانتی‌متر

بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح است.

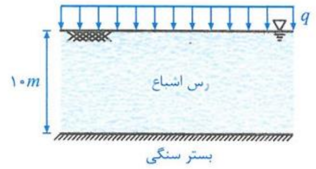
توجه: دقت شود که با توجه به واحد C_v، در محاسبات زمان t را برحسب سال قرار داده‌ایم.

زیر شاخه‌های قسمت پنجم

E-۱- محاسبهٔ نشست در حین تحکیم

E-۲- بحث در مورد کاربرد روابط درجهٔ تحکیم و عامل زمان

تمرین ۳۴: **یک لایهٔ خاک رس اشباع به ضخامت ۱۰ متر، مطابق شکل زیر روی یک بستر سنگی قرار گرفته است. ضریب تحکیم برای خاک رس، $3/14\ m^2/year$ در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. اگر نشست نهایی این لایه تحت یک بار گسترده برابر $20cm$ باشد، در آن‌صورت نشست تحکیمی آن بعد از گذشت ۴ سال چقدر است؟**



۱) $2cm$

۲) $4cm$

۳) $8cm$

۴) $16cm$

● **حل:** مطابق با گام‌بندی گفته شده پیش می‌رویم:

گام اول: مقدار C_v در صورت سؤال داده شده است و نیازی به محاسبهٔ آن نیست. $(C_v = \pi\ \ m^2/year)$

گام دوم: با توجه به اینکه در یک طرف رس (پایین) بستر سنگی نفوذناپذیر قرار داشته و طرف دیگر آن (بالا) هوا وجود دارد، بنابراین زهکشی لایه یک‌طرفه و از سمت بالاست، پس: $H_{dr} = H_0 = 10\ m$

حال مقدار T_v را می‌یابیم: $T_v = \dfrac{C_v\, t}{H_{dr}^2} = \dfrac{\pi \times 4}{10^2} = 0/04\,\pi$

گام سوم: اکنون نوبت محاسبهٔ U است که در اینگونه مسائل که نمودار یا رابطه‌ای برای ارتباط T_v و U داده نشده است، بهتر است ابتدا فرض کنیم $U < 60\%$ بوده که در این‌صورت خواهیم داشت:

$$T_v = \frac{\pi}{4} U^2 \ \Rightarrow\ 0/04\,\pi = \frac{\pi}{4} U^2 \ \Rightarrow\ U = 0/4 < 0/6\ \ O.K.$$

گام چهارم: در نهایت مقدار ΔH_t را در این لحظه محاسبه می‌کنیم: $\Delta H_t = U \times \Delta H_\infty = 0/4 \times 20 = 8\,cm$

پس گزینه (۳) درست است.

E-۲- بحث در مورد کاربرد روابط درجهٔ تحکیم و عامل زمان

در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از رابطهٔ اصلی عامل زمان و نیز رابطهٔ موجود بین درجهٔ تحکیم و عامل زمان، ارتباط زمان (منظور زمان گذشته از شروع تحکیم) با سایر پارامترها را بررسی کنیم. نگاهی دقیق‌تر به سؤالات کنکور نشان می‌دهد که در اینگونه مسائل، سه حالت پر کاربرد به شرح زیر وجود دارد:

حالت اول: بررسی ارتباط زمان با درجهٔ تحکیم در یک لایه خاک

همانطور که در ابتدای این قسمت دیدید برای درجه‌های تحکیم کمتر از ۶۰ درصد، رابطهٔ بین عامل زمان و درجهٔ تحکیم متوسط به‌صورت زیر است:

$$T_v = \frac{\pi}{4} U^2$$

از طرفی می‌دانیم رابطهٔ اصلی عامل زمان نیز به‌صورت زیر می‌باشد:

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2}$$

پس با مقایسه این دو رابطه می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\frac{\pi}{4} U^2 = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \ \Rightarrow\ t = \left(\frac{\pi}{4}\frac{H_{dr}^2}{C_v}\right) U^2$$

از طرفی می‌دانیم برای یک لایه خاک مشخص، عبارت داخل پرانتز در رابطهٔ فوق ثابت بوده و با گذشت زمان تغییر نمی‌کند، بنابراین می‌توان گفت:

$$\boxed{t \propto U^2}$$

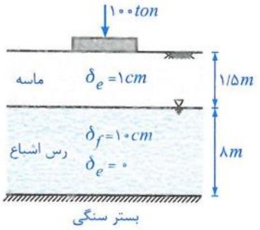
یعنی:

در یک لایهٔ رسی اگر درجه‌های تحکیم متوسط از ۶۰ درصد کمتر باشند، در آن‌صورت زمان لازم برای رسیدن به یک درجهٔ تحکیم، با مجذور U متناسب است.

در ادامه با حل یک تست مفهومی، این نتیجه را بهتر درک می‌کنیم.

تمرین ۳۵: یک پی مربع به بعد ۲ متر تحت بار قائم ۱۰۰ تن در مرکز خود سبب نشست الاستیک $\delta_e = 1cm$ در لایه ماسه و نشست تحکیمی معادل $2cm$ در لایه رسی اشباع بعد از مدت یک‌سال می‌گردد. در صورتی که نشست نهایی تحکیم لایه رس اشباع معادل $\delta_f = 10cm$ باشد، مقدار نشست کل پی بعد از ۴ سال چند سانتی‌متر است؟ (درصد تحکیم لایه رس طی ۴ سال کمتر از ٪۶۰ است.) (سراسری - ۸۷ و ۹۰)

۱) ۴
۲) ۵
۳) ۶
۴) ۷



پاسخ: با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال می‌دانیم:

۱- نشست الاستیک (آنی) خاک برابر $1cm$ بوده و از ابتدا تا انتهای تحکیم وجود دارد.

۲- نشست تحکیم لایه رسی پس از یک سال برابر $2cm$ است، پس درجهٔ تحکیم متوسط لایه در این لحظه برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{2}{10} = 0/2 \quad \text{یا} \quad 20\%$$

۳- درجه تحکیم لایه در حالت دوم هم از ٪۶۰ کمتر است، پس می‌توان گفت زمان با مجذور درجهٔ تحکیم لایه متناسب است.

حال با توجه به اطلاعات فوق درجه تحکیم متوسط لایهٔ رسی را پس از ۴ سال می‌یابیم و از آنجا مقدار نشست تحکیم در این لحظه را محاسبه می‌کنیم:

$$t \propto U^2 \Rightarrow \frac{t_2}{t_1} = (\frac{U_2}{U_1})^2 \Rightarrow \frac{4}{1} = (\frac{U_2}{0/2})^2 \Rightarrow U_2 = 0/4$$

$$\Delta H_t = U \times \Delta H_\infty = 0/4 \times 10 = 4\,cm$$

و در نهایت نشست کل پی بعد از ۴ سال برابر خواهد بود با:

$$\Delta H_{\text{کل}} = \Delta H_t + \delta_e = 4 + 1 = 5\,cm$$

نشست الاستیک (آنی) که از همان ابتدا به وجود آمده است.

پس گزینهٔ (۲) صحیح است.

کمی خلاقیت

چون $t \propto U^2$ است، می‌توان گفت که $U \propto \sqrt{t}$ است. پس اگر پس از زمان یک سال، نشست تحکیمی $2cm$ باشد، پس از زمان چهار سال، درصد تحکیم (U) در لایه دو برابر شده و با دو برابر شدن آن، میزان نشست نیز ۲ برابر می‌شود و نشست تحکیمی به $4cm$ می‌رسد.

حالت دوم: بررسی ارتباط زمان با مشخصات خاک وقتی دو لایه خاک مختلف با درجه‌های تحکیم یکسان داریم.

وقتی دو لایه خاک با درجه‌های تحکیم یکسان داریم، حتماً عامل زمان (T_v) نیز برای هر دوی آنها یکسان است، زیرا به‌ازای هر درجهٔ تحکیم یک عامل زمان منحصربه‌فرد وجود دارد (روابط T_v و U را به یاد آورید). پس در این شرایط کافی است تا از رابطهٔ اصلی عامل زمان کمک گرفته و T_v این دو لایه را با هم مساوی قرار دهیم:

$$\text{شرط یکسان بودن درجهٔ تحکیم} : T_{v_1} = T_{v_2} \Rightarrow \frac{C_{v_1} t_1}{H_{dr_1}^2} = \frac{C_{v_2} t_2}{H_{dr_2}^2} \Rightarrow \frac{t_2}{t_1} = (\frac{H_{dr_2}}{H_{dr_1}})^2 (\frac{C_{v_1}}{C_{v_2}})$$

با توجه به رابطه بالا می‌توان گفت:

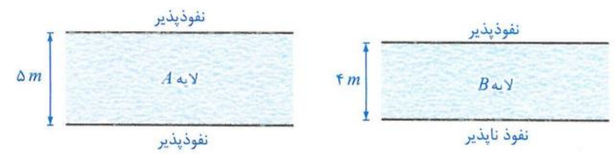
$$t \propto \frac{H_{dr}^2}{C_v}$$

یعنی:

در یک لایهٔ رسی، زمان لازم برای رسیدن به درجه‌های تحکیم یکسان، با مجذور H_{dr} رابطهٔ مستقیم و با C_v نسبت عکس دارد.

تمرین ۳۶: نسبت زمان لازم برای رسیدن به درجهٔ تحکیم ۹۰ درصد در لایهٔ A به لایهٔ B (شکل زیر)، چقدر است؟ جنس دو لایه را یکسان فرض کنید. (سراسری - ۹۲)

۱) ۰/۸
۲) ۰/۳۹
۳) ۱/۲۸
۴) ۱/۲۵



پاسخ: دو لایه خاک با درجه‌های تحکیم یکسان داریم، بنابراین کافی است تا T_v آنها را با هم برابر قرار دهیم:

$$T_{v_A} = T_{v_B} \Rightarrow \frac{C_{v_A} \times t_A}{H_{dr_A}^2} = \frac{C_{v_B} \times t_B}{H_{dr_B}^2}$$

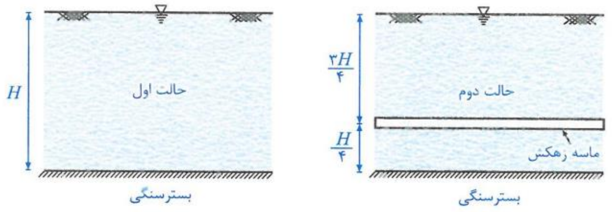
از طرفی چون جنس خاک دو لایه یکسان است، بنابراین $C_{v_A} = C_{v_B}$ بوده و از دو طرف تساوی ساده می‌شود، پس در ادامه می‌توان نوشت:

$$\frac{t_A}{t_B} = \left(\frac{H_{dr_A}}{H_{dr_B}}\right)^2 = \left(\frac{5 \times \frac{1}{2}}{4}\right)^2 = \frac{25}{64} = 0/39$$

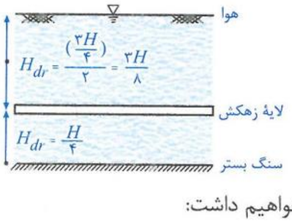
بنابراین گزینه (۲) جواب صحیح است.

تمرین ۳۷: اگر در تراز $\frac{3}{4}$ ضخامت از سمت بالای یک لایه رسی واقع بر بستر سنگی، یک لایه افقی ماسه زهکش با ضخامت قابل اغماض قرار دهیم (شکل حالت ۲)، نسبت بیشترین زمان تحکیم بین دو حالت ۲ و ۱ (مطابق شکل) برای ۵۰ درصد تحکیم چقدر است؟ (سراسری - ۸۶)

۱) $\frac{9}{16}$
۲) $\frac{9}{64}$
۳) $\frac{3}{8}$
۴) $\frac{1}{16}$



پاسخ: در این سؤال با قرار دادن لایهٔ زهکش در تراز مورد نظر از لایهٔ رسی، الگوی زهکشی تغییر کرده است و ما می‌خواهیم تأثیر این تغییر را روی زمان تحکیم ببینیم. پس ابتدا بیایید H_{dr} در حالت دوم را تعیین کنیم:



$\Rightarrow$ بیشترین زمان تحکیم در لایهٔ دوم به‌ازای H_{dr} بزرگتر حاصل می‌شود، پس ما $H_{dr} = \frac{3H}{8}$ را انتخاب می‌کنیم.

حال در ادامه و با توجه به یکسان بودن درجهٔ تحکیم و جنس خاک در دو حالت، مشابه با تمرین قبلی خواهیم داشت:

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{H_{dr_2}}{H_{dr_1}}\right)^2 = \left(\frac{\frac{3H}{8}}{H}\right)^2 = \frac{9}{64}$$

بنابراین گزینه (۲) درست است.

حالت سوم: بررسی ارتباط زمان با مشخصات خاک و درجهٔ تحکیم وقتی دو لایه خاک با درجه‌های تحکیم متفاوت داریم.

وقتی درجهٔ تحکیم از ۶۰ درصد کمتر باشد، مشابه با حالت اول می‌نویسیم:

$$\begin{cases} T_v = \frac{\pi}{4} U^2 \\ T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \end{cases} \Rightarrow \frac{\pi}{4} U^2 = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \Rightarrow t = \frac{\pi}{4}\left(\frac{U^2 H_{dr}^2}{C_v}\right)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که:

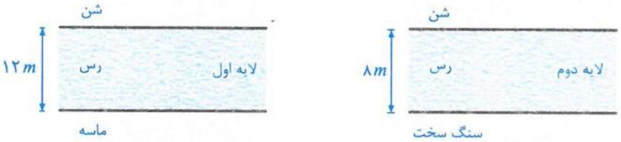
$$t \propto \frac{U^{۲} \times H_{dr}^{۲}}{C_v}$$

یعنی:

وقتی در یک لایهٔ رسی درجه‌های تحکیم متوسط از ۶۰ درصد کمتر باشند، در آن‌صورت زمان لازم برای رسیدن به یک درجهٔ تحکیم، با مجذور H_{dr} و U رابطهٔ مستقیم داشته و با C_v نسبت عکس دارد.

تذکر: اگر درجه تحکیم از ۶۰ درصد بیشتر باشد، دیگر رابطه بالا برقرار نیست و نمی‌توانید از آن استفاده کنید.

تمرین ۳۸: دو لایه از یک نوع خاک رس اشباع با مشخصات زیر موجود است. چنانچه تحت شرایطی لایه اول ۲۰ درصد از نشست تحکیم خود را در ۵ سال انجام دهد، معین کنید تحت همان شرایط ۳۰ درصد از نشست تحکیم در لایه دوم چند سال بعد اتفاق خواهد افتاد؟ (سراسری - ۸۸)



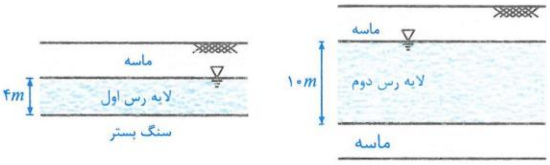
۱) ۵
۲) ۱۰
۳) ۱۵
۴) ۲۰

● حل: دو لایه خاک از یک نوع (جنس یکسان و C_vهای برابر) در اختیار داریم و می‌خواهیم نسبت زمان‌های آنها را به‌دست آوریم. در این حالت درجه تحکیم لایه‌ها با هم فرق داشته ولی از ۶۰ درصد کمتر است، بنابراین می‌توان گفت زمان با مجذور H_{dr} و U متناسب بوده و می‌نویسیم:

$$\frac{t_{۲}}{t_{۱}} = \left(\frac{U_{۲}}{U_{۱}}\right)^{۲}\left(\frac{H_{dr_{۲}}}{H_{dr_{۱}}}\right)^{۲} \Rightarrow \frac{t_{۲}}{۵} = \left(\frac{۳۰}{۲۰}\right)^{۲} \times \left(\frac{۸}{۱۲ \times \frac{۱}{۲}}\right)^{۲} \Rightarrow t_{۲} = ۲۰ \text{ سال}$$

بنابراین گزینه (۴) درست است.

تمرین ۳۹: دو لایه خاک رس اشباع مطابق شکل زیر موجود است. در اثر بارگذاری‌های انجام شده لایهٔ اول در مدت ۲۰ سال ۵۰ درصد و لایهٔ دوم در مدت ۱۰ سال ۴۰ درصد نشست تحکیمی داشته‌اند. ضریب تحکیم لایهٔ اول چند برابر ضریب تحکیم لایه دوم است؟ (سراسری - ۸۹)



۱) نصف
۲) دو برابر
۳) ۸ برابر
۴) $\frac{۱}{۸}$

● حل: دو لایه خاک با درجه‌های تحکیم متفاوت (و البته کمتر از ٪۶۰) داریم که اینبار جنس آنها نیز یکی نیست، بنابراین با توجه به مطلب خوانده شده می‌نویسیم:

$$t \propto \frac{U^{۲} \times H_{dr}^{۲}}{C_v} \Rightarrow \frac{t_{۲}}{t_{۱}} = \left(\frac{U_{۲}}{U_{۱}}\right)^{۲} \times \left(\frac{H_{dr_{۲}}}{H_{dr}}\right)^{۲} \times \frac{C_{v_{۱}}}{C_{v_{۲}}} \Rightarrow \frac{۱۰}{۲۰} = \left(\frac{۴۰}{۵۰}\right)^{۲} \times \left(\frac{۱۰ \times \frac{۱}{۲}}{۴}\right)^{۲} \times \frac{C_{v_{۱}}}{C_{v_{۲}}} \Rightarrow \frac{C_{v_{۱}}}{C_{v_{۲}}} = \frac{۱}{۲}$$

بنابراین گزینه (۱) پاسخ صحیح است.

F-۱- اثر مدت زمان ساخت در محاسبهٔ نشست تحکیم

فرض کنید می‌خواهیم یک خاکریز به ضخامت ۳ متر و وزن مخصوص $20\,kN/m^3$ را بر روی یک لایه خاک رس اشباع اجرا کنیم و این اجرا بسته به شرایط پیمانکار به دو صورت قابل انجام است:

حالت اجرایی (۱): در این شرایط پیمانکار امکانات مناسبی داشته و در زمان کوتاهی خاکریز را اجرا می‌کند.

حالت اجرایی (۲): در این شرایط پیمانکار امکانات کمی داشته و اجرای خاکریز ۴ ماه طول می‌کشد.

حال از ما پرسیده‌اند که **پس از یکسال از شروع اجرای خاکریزی**، نشست تحکیم در هر دو حالت چقدر است؟

احتمالاً شما نیز حدس زده‌اید که این دو حالت نبایستی نشست یکسانی را در زمان مورد نظر (یک سال) ایجاد کنند. در ادامه می‌خواهیم با طرح چند سؤال مفهومی، تفاوت این دو حالت اجرایی در ایجاد نشست تحکیم را ببینیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: برای محاسبهٔ نشست تحکیم در زمان مورد نظر (یک سال)، در رابطهٔ $T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$ در حالت اجرایی (۱)، زمان t را چقدر در نظر می‌گیرید؟

● پاسخ: با توجه به اینکه t زمان گذشته از شروع تحکیم است و بار نیز به‌صورت آنی وارد شده و پس از آن تحکیم رخ داده است، بنابراین t همان یک سال در نظر گرفته می‌شود.

سؤال ۲: در محاسبهٔ تحکیم در حالت اجرایی (۲) آیا درست است که t را برابر یک سال فرض کنیم یا بهتر است خاتمهٔ بارگذاری را ملاک قرار داده و t را مساوی ۸ ماه در نظر بگیریم؟

● پاسخ: بیایید دو حالت پیشنهاد شده را بیشتر بررسی کنیم:

۱- اگر زمان t را برابر یک سال در نظر بگیریم، مثل این است که فرض کرده‌ایم یک سال از وارد شدن کامل بار خاکریز گذشته است که البته فرض غلطی است زیرا ۴ ماه طول کشیده است تا تمام بار به خاک وارد شود.

۲- اگر زمان t را برابر ۸ ماه ($8 = 12 - 4$) در نظر بگیریم مثل این است که فرض کرده باشیم خاک رس ۴ ماه نشست را متوقف کرده و بعد از خاتمهٔ بارگذاری، تازه نشست شروع شده است که این نیز غلط است (خاک رس منتظر ما نمی‌ماند تا بارگذاری را تمام کنیم).

سؤال ۳: با توجه به سؤال قبل، پس چه زمانی را برای t در حالت (۲) در نظر می‌گیریم؟

● پاسخ: در این حالت باید از یک **زمان اصلاح شده** به‌نام t_m استفاده کنیم. استفاده از زمان t_m به این معنی است که فرض کرده‌ایم بارگذای به‌صورت آنی وارد شده است و اکنون مدت زمان t_m از اعمال بار و شروع تحکیم گذشته است. برای تعیین t_m کافی است تا سطح زیر نمودار بار - زمان در حالت واقعی (که بارگذاری تدریجی است) با سطح زیر نمودار بار - زمان در حالت ایده‌آل (که بارگذاری آنی فرض شده است) مساوی باشد. بسته به اینکه زمان t بعد یا قبل از زمان ساخت (t_c) مورد نظر باشد ($t \geq t_c$ و یا $t \leq t_c$)، دو حالت قابل بررسی است که در ادامه به آنها می‌پردازیم:

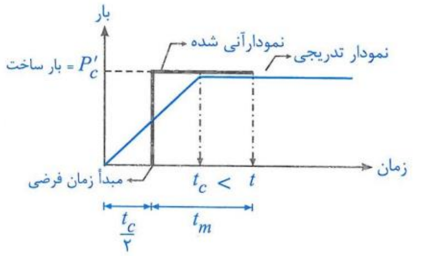
قسمت ششم (مباحث تکمیلی نشست خاک)

زیر شاخه‌های قسمت ششم

F-۱- اثر مدت زمان ساخت در محاسبهٔ نشست تحکیم
F-۲- تحکیم ثانویه
F-۳- زهکش‌های ماسه‌ای و تحکیم سه بعدی
F-۴- نشست الاستیک (آنی)
F-۵- معادلهٔ تحکیم یک بعدی ترزاقی

حالت اول: $t \geq t_c$ باشد، یعنی نشست تحکیم بعد از خاتمهٔ بارگذاری (بعد از زمان ساخت) مدنظر باشد.

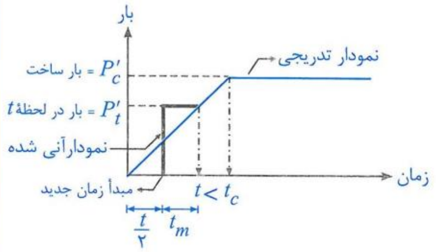
در این شرایط اگر سطح زیر نمودار آنی شده را با نمودارِ بارگذاری تدریجی مساوی قرار دهیم، مبدأ زمان بایستی به اندازه $\frac{t_c}{۲}$ به‌سمت راست حرکت کند (چرا؟) یعنی t_m برابر می‌شود با:



$$t_m = t - \frac{t_c}{۲}$$

حالت دوم: $t \leq t_c$ باشد، یعنی نشست تحکیم در حین بارگذاری (قبل از زمان ساخت) مدنظر باشد.

در این شرایط اگر سطح زیر نمودار آنی شده را با نمودار بارگذاری تدریجی مساوی قرار دهیم، مبدأ زمان به اندازه $\frac{t}{۲}$ به سمت راست حرکت می‌کند یعنی t_m برابر می‌شود با:

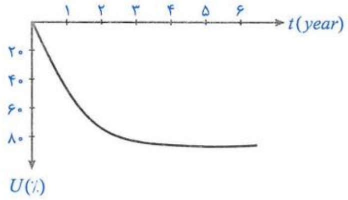


$$t_m = t - \frac{t}{۲} \Rightarrow t_m = \frac{t}{۲}$$

تذکر: درحالتی که $t < t_c$ است، چون بار وارد شده تا لحظه t (P'_t) برابر کل بار ساخت (P'_c) نیست، بنابراین بعد از محاسبه نشست بایستی مقدار آن‌را در ضریب اصلاح بار نیز ضرب کرده و مقدار نشست را کاهش دهیم:

$$\text{ضریب اصلاح بار} = \frac{P'_t}{P'_c} \xrightarrow[\text{نمودار اعمال بار با زمان}]{\text{با فرض خطی بودن}} \text{ضریب اصلاح بار} = \frac{t}{t_c}$$

تمرین ۴۰: منحنی زمان - نشست برای تحکیم خاکی با فرض بارگذاری آنی ترسیم شده است. چنانچه زمان ساخت $t_c = ۳$ سال باشد، تقریباً چند سال پس از اتمام بارگذاری، ۸۰٪ نشست نهایی انجام می‌شود؟ ($U = ۸۰٪$) (سراسری - ۸۹)



۱) ۴
۲) ۲
۳) ۳
۴) ۱

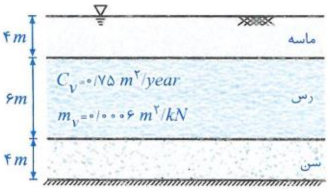
● در این سؤال بارگذاری به‌صورت تدریجی انجام شده است ولی منحنی ترسیم شده مربوط به بارگذاری آنی می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که متغیر زمان در این منحنی، t_m یعنی زمان اصلاح شده می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه زمانِ پس از اتمام بارگذاری مدنظر است می‌توان گفت که $t > t_c$ بوده و بنابراین خواهیم داشت:

$$U = ۸۰٪ \xrightarrow{\text{زمان متناظر از روی منحنی}} t_m = ۲/۵ \text{ سال} \quad , \quad t_m = t - \frac{t_c}{۲} \Rightarrow ۲/۵ = t - \frac{۳}{۲} \Rightarrow t = ۴ \text{ سال}$$

اما اشتباه نکنید! گزینه (۱) پاسخ این تست نیست، زیرا زمان گذشته از اتمام بارگذاری خواسته شده است در حالی‌که t زمان گذشته از شروع بارگذاری است. پس جواب تست به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\text{زمان گذشته از اتمام بارگذاری} = t - t_c = ۴ - ۳ = ۱ \text{ سال} \Rightarrow$$ گزینه (۴) درست است.

تمرین ۴۱: برروی نیمرخ نشان داده شده در شکل مقابل، ظرف مدت یک سال، خاکریزی به ارتفاع ۵ متر و وزن مخصوص $۲۰ kN/m^۳$ ساخته می‌شود. مطلوب است تعیین نشست تحکیم لایه رسی: $(\pi = ۳)$



الف) پس از خاتمه تحکیم
ب) ۶ ماه پس از شروع عملیات خاکریزی
ج) ۶ ماه پس از خاتمه عملیات خاکریزی
د) زمانی‌که ٪۸۰ تحکیم رخ داده است.

پاسخ

الف) مشابه با مسائل دستهٔ سوم از قسمت سوم این فصل، با داشتن مقدار m_v، نشست تحکیم نهایی خاک رس را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta H = H_{\circ} m_v \Delta\sigma' = (۶۰۰)(۰/۰۰۰۶)(۲۰ \times ۵) = ۳۶ cm$$

ب) در ماه ۶، $t = ۶$، $t < t_c$ بوده و داریم:

$$t = ۰/۵ \text{ سال} < t_c = ۱ \text{ سال} \Rightarrow t_m = \frac{t}{۲} = \frac{۰/۵}{۲} = ۰/۲۵ \text{ سال}$$

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^۲} = \frac{۰/۷۵ \times ۰/۲۵}{(\frac{۶}{۲})^۲} = \frac{۱}{۴۸}$$

پس از محاسبهٔ T_v، مقدار U (درصد تحکیم) برابر می‌شود با:

$$T_v = \frac{\pi}{۴} U^۲ \ (U < ۰/۶ \text{ با فرض}) \Rightarrow \frac{۱}{۴۸} = \frac{\pi}{۴} \times U^۲ \Rightarrow U^۲ = \frac{۱}{۱۲\pi} \xrightarrow{\pi = ۳} U = \frac{۱}{۶} < ۰/۶ \quad O.K.$$

و در نهایت نشست خاک پس از ۶ ماه، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta H_t = U \times \Delta H_{\infty} = \frac{۱}{۶} \times ۳۶ = ۶ cm$$

البته فراموش نکنید که باید ضریب اصلاح بار را نیز اعمال کنیم (چون $t < t_c$ است)، بنابراین خواهیم داشت:

$$\text{(اصلاح شده)} \ \Delta H = \Delta H (\frac{t}{t_c}) = ۶ \times (\frac{۰/۵}{۱}) = ۳ cm$$

ج) در این زمان چون سال $t_c = ۱ <$ سال $t = ۱/۵$ است، زمان t_m برابر است با:

$$t = ۱/۵ > t_c = ۱ \Rightarrow t_m = t - \frac{t_c}{۲} = ۱/۵ - \frac{۱}{۲} = ۱ \text{ سال}$$

اگر بخواهیم این زمان را با زمان قبلی $(t_m = ۰/۲۵)$ مقایسه کنیم، در آن‌صورت با فرض $U < ٪۶۰$ در حالت دوم و با توجه به مطالب گفته شده در قسمت قبل خواهیم داشت:

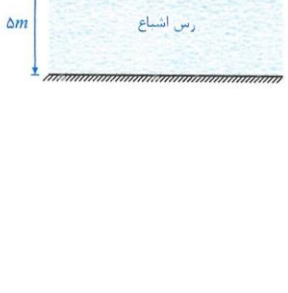
$$\frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{U_۲}{U_۱})^۲ \Rightarrow (\frac{۱}{۰/۲۵}) = \left[\frac{U_۲}{(\frac{۱}{۶})}\right]^۲ \Rightarrow U_۲ = \frac{۱}{۳} < ۰/۶ \quad O.K. \Rightarrow \Delta H_t = U \times \Delta H_{\infty} = \frac{۱}{۳} \times ۳۶ = ۱۲ cm$$

د) در این حالت چون درجهٔ تحکیم مشخص است، بنابراین نیازی به زمان اصلاح شده نداریم و می‌نویسیم:

$$\Delta H = U \times \Delta H_{\infty} = ۰/۸ \times ۳۶ = ۲۸/۸ cm$$

F-۲- تحکیم ثانویه

پروفیل شکل زیر را در نظر بگیرید که تحت بار گستردهٔ $q = ۱۰۰ kN/m^۲$ در یک سطح وسیع قرار گرفته است. در این شرایط نشست تحکیم نهایی در لایهٔ رسی وقتی اتفاق می‌افتد که تمام بار $q = ۱۰۰ kN/m^۲$ به رس رسیده باشد. واضح است که از این به بعد دیگر اضافه تنش مؤثری در خاک رس نخواهیم داشت، ولی آیا نشست خاک نیز متوقف می‌شود؟



آزمایش‌های تجربی محققین نشان داده است که پس از اتمام تحکیم اولیه و محو کامل اضافه فشار آب حفره‌ای، باز هم نشست خـاک ادامـه دارد ولی این بار فشار آب حفره‌ای و تنش مؤثر در خاک رس تغییر نمی‌کنند. به‌عبارت دیگر خاک رس تحت یک تنش مـؤثر ثابـت متـراکم می‌شود و نشست می‌کند. به این نشست، **تحکیم ثانویه، تراکم ثانویه** یا **خزش در خاک** گفته می‌شود.

در مورد تحکیم ثانویه به نکات زیر توجه کنید:

۱) اگرچه به اشتباه تصور می‌شود که تحکیم ثانویه پس از اتمام تحکیم اولیه آغاز می‌شود ولی باید بدانید کـه تحکـیم ثانویـه در واقعیـت، هم‌زمان با تحکیم اولیه شروع می‌شود.

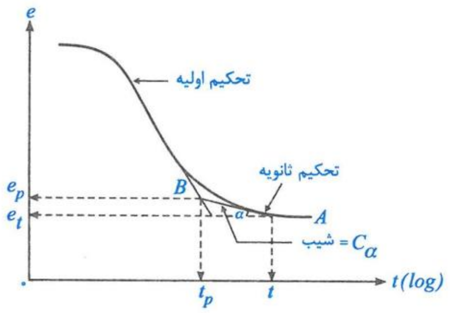
۲) علت دقیق تحکیم ثانویه به‌درستی معلوم نیست ولی محققین تصور می‌کنند که علت آن جابه‌جایی تدریجی ذرات رس و رسیدن به یک حالت متعادل‌تر است که با خروج مقداری آب از خاک رس همراه است.

۳) به هنگام تحکیم ثانویه مقداری از آب جذب سطحی به حالت روان در می‌آید و باعث خروج آب آزاد از خاک رس می‌شود.

۴) هرچه خاک رس پر آب‌تر باشد، تحکیم ثانویهٔ آن بیـشتر خواهـد بـود. مـثلاً خـاک رس عـادی تحکـیم یافتـه یـا خـاک رس بـا کـانی مونت‌موریلونیت، تحکیم ثانویه قابل توجهی دارند.

محاسبه تحکیم ثانویه

اگرچه گفتیم که تحکیم ثانویه همزمان با تحکیم اولیه شروع می‌شود ولی باید بدانید که محاسبهٔ تحکیم ثانویه بعد از خاتمـهٔ تحکـیم اولیـه در نظـر گرفتـه می‌شود. برای این کار ابتدا با استفاده از نتـایج آزمـایش تحکـیم یـک بعـدی، منحنی نسبت تخلخل - زمان (لگاریتمی) را ترسیم می‌کنـیم کـه نتیجـهٔ آن به‌صورت مقابل است.



توجه کنید که در منحنی ترسیم شده امتداد دو قسمت خطی (پر شیب) و منحنی (کم شیب) یکدیگر را در نقطهٔ B قطع می‌کنند و ما فرض می‌کنیم که در این نقطه، تحکیم اولیه خاتمه یافته است. زمان و نسبت تخلخل در این نقطه را به‌ترتیب با t_p و e_p نشان می‌دهـیم و نـسبت تخلخل متناظر با زمان t را نیز با e_t نشان داده‌ایم.

حال در ادامه به‌صورت زیر پارامتر C_α را که **نشانهٔ فشردگی ثانویه** نام دارد، می‌یابیم:

$$C_\alpha = \tan\alpha = \frac{e_p - e_t}{\log t - \log t_p} = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t}{t_p}\right)}$$

در نهایت نیز از رابطهٔ کلی تغییر شکل به‌صورت زیر استفاده کرده و تراکم ثانویه را محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{\Delta H_s}{H_\circ} = \frac{\Delta e}{1+e_p} \quad , \quad \Delta e = C_\alpha \log\left(\frac{t}{t_p}\right) \Rightarrow \boxed{\Delta H_s = \frac{H_\circ}{1+e_p} C_\alpha \log\left(\frac{t}{t_p}\right)}$$

توجه کنید که در رابطهٔ بالا $H_\circ$ ضخامت اولیهٔ لایه رسی در ابتدای تحکیم اولیه است ولی e_p نسبت تخلخل خاک در پایان تحکیم اولیه (یـا همان شروع محاسبهٔ تحکیم ثانویه) است. البته **ترزاقی به اشتباه به‌جای e_p از $e_\circ$ در رابطهٔ فوق استفاده می‌کند** که تحقیقات بعدی محققین نادرست بودن نظر ترزاقی را نشان داده است.

همانطورکه روی نمودار نیز مشخص است، t_p مدت زمان تحکیم اولیه بوده و t نیز زمان گذشته از شروع تحکیم و بارگذاری می‌باشد.

تمرین ۴۲: برای یک لایهٔ رس خیلی نرم به ضخامت ۲۰ متر، تحکیم اولیه دو سال بـه طـول انجامیـده اسـت. اگـر ضـریب تـراکم ثانویـه ایـن خاک $C_\alpha = ۰/۰۵$ باشد، میزان نشست اضافی ناشی از تراکم ثانویه در این لایهٔ رس، پس از گذشت ۲۰ سال چند سانتی‌متر خواهد بود؟ ($e_\circ = ۱/۰$)

۱) ۱۲/۵ ۲) ۲۵ ۳) ۱۰۰ ۴) ۵۰ (سراسری - ۹۱)

مثال: برای محاسبهٔ نشست تحکیم ثانویه (تراکم ثانویه) از رابطهٔ گفته شده استفاده می‌کنیم:

$$\Delta H_s = \frac{H_\circ}{1+e_p} C_\alpha \log\left(\frac{t}{t_p}\right)$$

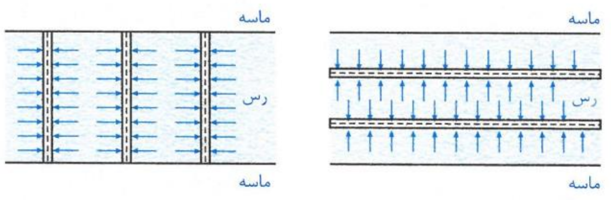
در رابطهٔ فوق e_p نسبت تخلخل در انتهای تحکیم اولیه (e_f) است که ترازقی به اشتباه آن را برابر $e_\circ$ در نظر می‌گیرد. در این تست گویا طراح سؤال نیز با ترزاقی هم‌نظر بوده است و مقدار $e_\circ$ را (به‌جای e_p) در صورت سؤال داده است. بنابراین (هر چند اشتباه) می‌نویسیم:

$$\Delta H_s = \frac{20}{1+1} \times 0.05 \log\left(\frac{20}{2}\right) = 0.5\, m = 50\, cm$$

پس گزینه (۴) پاسخ این تست است.

F-۳- زهکش‌های ماسه‌ای و تحکیم سه بعدی

برای اینکه سازه در دوران بهره‌برداری دچار نشست‌های ناشی از پدیدهٔ تحکیم نشود، معمولاً خاک را قبل از ساخت سازه، توسط عملیات خاکریزی پیش‌بارگذاری می‌کنند. در این صورت خاکریز فشاری معادل فشار سازه را که بعداً قرار است ساخته شود، به خاک وارد می‌کند و بعد از اینکه خاک تحکیم پیدا کرد، این خاکریزی برداشته شده و سازه ساخته می‌شود. در این حالت به‌علت طولانی بودن عملیات تحکیم، زهکش‌هایی را به‌صورت ساختگی (مصنوعی) در داخل خاک ایجاد می‌کنند تا سرعت زهکشی آب بیشتر شود. این زهکش‌ها می‌توانند به‌صورت افقی یا قائم، مطابق شکل زیر در خاک تعبیه شوند. جنس این زهکش‌ها معمولاً از مصالح دانه‌ای (مثل ماسه) با دانه‌بندی مخصوص و نفوذپذیری مناسب است.

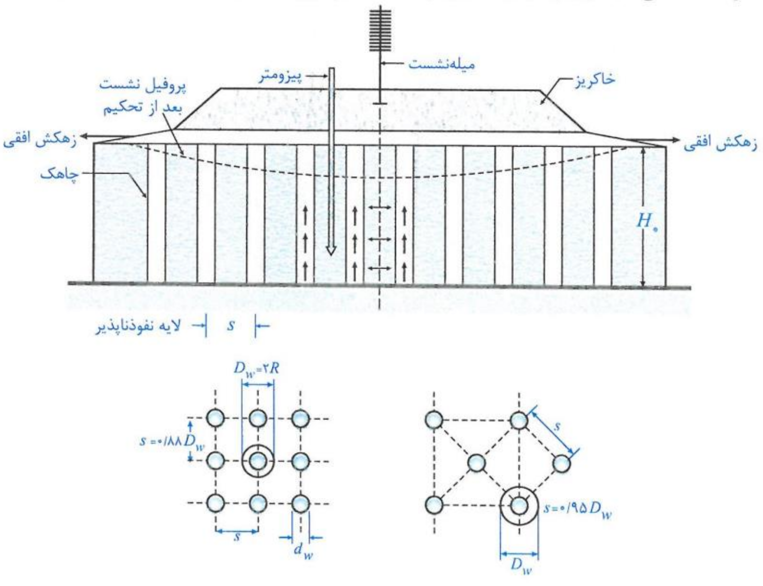


زهکش‌های قائم   زهکش‌های افقی

در مورد زهکش‌های افقی و قائم و تحکیم ایجاد شده توسط آنها به نکات زیر توجه کنید:

۱) در زهکش‌های قائم آب به‌صورت افقی و در زهکش‌های افقی آب به‌صورت قائم به زهکش وارد شده و از آن طریق خارج می‌شود. چون در خاکها ضریب نفوذپذیری درجهت افقی معمولاً از ضریب نفوذپذیری درجهت قائم بیشتر است، بنابراین آب از طریق زهکش‌های قائم زودتر زهکشی می‌شود. از این‌رو در صورتیکه از زهکش‌های افقی و قائم با فواصل یکسان استفاده شود، تأثیر زهکش‌های قائم در سرعت دادن به عمل تحکیم بیشتر است.

۲) زهکش‌های قائم به‌صورت چاهک‌هایی با فواصل مساوی در عمق خاک قرار دارند که نمای بالای آنها نیز در پایین شکل زیر نشان داده شده است. باتوجه به حرکت شعاعی آب برای رسیدن به این چاهک‌ها، این نوع تحکیم را **تحکیم شعاعی** می‌نامند.



۳ درجه تحکیم کلی لایه در این حالت به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$(1-U_{کل}) = (1-U_r)(1-U_z)$$

که در رابطهٔ بالا U_r و U_z به‌ترتیب درجه تحکیم شعاعی و درجه تحکیم در امتداد قائم می‌باشند. حال اگر تحکیم خاک در هر سه راستای x و y و z انجام شود، در آن صورت درجهٔ تحکیم کلی را مشابه با رابطه بالا، به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$U_{کل} = 1-(1-U_x)(1-U_y)(1-U_z)$$

لازم به ذکر است که استفاده از تحکیم شعاعی (زهکش‌های قائم) در خاک‌های رسی با تراکم اولیه زیاد (بسیار سخت) یا تراکم ثانویه قابل توجه، مناسب نمی‌باشد.

در ادامه با حل یک تمرین ساده چگونگی محاسبهٔ عملی درجهٔ تحکیم لایه در حالت تحکیم سه بعدی را به شما یاد می‌دهیم:

تمرین ۴۳: یک مکعب رسی به ضلع $8m$ را درنظر بگیرید که در اطراف آن کانال ماسه‌ای ایجاد شده و بالا و پایین آن نیز توسط لایه‌های ماسه‌ای زهکشی می‌شوند. اگر این مکعب در زیر یک ستون قرارگرفته باشد و در اثر بار ستون، فشار آب حفره‌ای در مرکز مکعب $1/5\ kg/cm^2$ افزوده شود، با فرض ضریب تحکیم یکسان و برابر با $0/005 m^2/day$ در تمام جهت‌ها، درجه تحکیم متوسط لایه بعد از ۶۰۰ روز را به‌دست آورید. ($\pi = 3$)

حل:

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2} = \frac{(0/005)(600)}{(\frac{8}{2})^2} = \frac{3}{16}$$

$$T_v = \frac{\pi}{4} U^2 \ (U < 0/6 \text{ با فرض}) \Rightarrow \frac{3}{16} = \frac{\pi}{4} U^2 \xrightarrow{\pi = 3} U = 0/5 < 0/6$$

$$U = 1-(1-U_x)(1-U_y)(1-U_z) = 1-(1-0/5)(1-0/5)(1-0/5) = 1-(\frac{1}{2})^3 = \frac{7}{8} = 0/875 = 87/5\%$$

F-۴- نشست الاستیک (آنی)

در ابتدای این فصل (پیشگفتار) دیدید که وقوع انواع نشست در خاک‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

۱- خاک دانه‌ای ⇐ فقط نشست الاستیک مورد توجه بوده و محاسبه می‌شود.

۲- خاک رس ⇐
- غیر اشباع ⇐ فقط نشست الاستیک دارد.
- نزدیک به اشباع ⇐ نشست الاستیک و نشست تحکیم دارد.
- اشباع ⇐ از نشست الاستیک صرف‌نظر کرده و فقط نشست تحکیم در نظر گرفته می‌شود.

همانطور که ملاحظه می‌کنید نشست الاستیک در همهٔ خاک‌ها مورد توجه بوده و محاسبه می‌شود، مگر آنکه خاک رس اشباع (با نشست تحکیم قابل توجه) داشته باشیم و از نشست الاستیک در مقابل نشست تحکیم صرف‌نظر کنیم.

نشست الاستیک که به **نشست آنی** نیز معروف است. بلافاصله بعد از بارگذاری شروع شده و حداکثر تا ۱۰ روز بعد، ادامه دارد. در محاسبه نشست آنی فرض می‌شود که رفتار خاک الاستیک است و بر همین اساس، با استفاده از روابط تئوری الاستیسیته، نشست آنی (S_e یا δ_e) را به‌صورت زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$S_e = q . B . (\frac{1-\mu_s^2}{E_s}) . I_p$$

که در این رابطه:

q: شدت بار پی بر خاک است که برابر نیروی وارد بر پی تقسیم بر مساحت آن می‌باشد.

B: حداقل بعد پی (عرض پی) μ_s: ضریب پواسون خاک E_s: مدول ارتجاعی خاک

I_p: ضریب تأثیر پی که به شکل پی و صلبیت آن بستگی دارد و برای دو پی با صلبیت یکسان و نسبت طول به عرض برابر، مقدار یکسانی است. به‌عنوان مثال اگر دو پی مربعی با صلبیت یکسان داشته باشیم چون نسبت طول به عرض هر دوی آنها برابر یک است، دارای I_p یکسانی خواهند بود.

تذکر: رابطهٔ ارائه شده برای تعیین نشست الاستیک مربوط به حالتی است که پی بر سطح زمین واقع شده باشد و خاک زیر پی نیز یک نیم فضای نامحدود باشد یعنی مثلاً در زیر آن یک بستر سنگی نداشته باشیم. در غیر این‌صورت از ضرایب اصلاحی استفاده می‌شود که در درس پی‌سازی به آن پرداخته‌ایم.

در ادامه یک تمرین ساده از محاسبهٔ نشست الاستیک که مربوط به آزمون سراسری ۸۶ است آورده شده تا شما با نمونه تست‌های این مبحث در آزمون آشنا شوید. لازم به ذکر است که در این بخش تنها به محاسبهٔ نشست الاستیک اکتفا کرده‌ایم و موضوعاتی چون **محاسبهٔ نشست الاستیک با استفاده از ضریب عکس‌العمل بستر، نشست الاستیک نامتقارن پی‌ها، فشار و نشست در زیر پی‌ها و** ... را به درس پی‌سازی واگذار کردیم. شما عزیزان می‌توانید در **فصل دوم کتاب پی‌سازی سری عمران** این مباحث را به‌طور کامل مطالعه کنید.

تمرین ۴۴: نشست آنی (الاستیک) یک پی به ابعاد $B \times L$ واقع بر خاک دانه‌ای با مدول الاستیک E و ضریب پواسون ν تحت بار P برابر δ_1 می‌باشد. اگر ابعاد پی ۲ برابر $(2L \times 2B)$ گردد، میزان نشست پی δ_2 می‌گردد. نسبت $\frac{\delta_2}{\delta_1}$ عبارتست از (عمق مدفون پی‌ها صفر است):

۱) $\frac{1}{4}$　　۲) $\frac{1}{2}$　　۳) ۲　　۴) ۴　　(سراسری - ۸۶)

● **حل:** با توجه به اینکه نسبت $\frac{L}{B}$ پی در دو حالت یکسان است $(\frac{2L}{2B} = \frac{L}{B})$، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب تأثیر I_p نیز در هر دو حالت یکی است. از طرفی خاک زیر پی در حالت دوم نسبت به حالت اول تغییر نکرده است، پس ν و E نیز در هر دو حالت یکسان خواهند بود. از این‌رو با توجه به رابطهٔ محاسبه δ_e می‌نویسیم:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{q_2}{q_1} \times \frac{B_2}{B_1} = \frac{(\frac{P}{2L \times 2B})}{(\frac{P}{L \times B})} \times \frac{2B}{B} = \frac{1}{4} \times 2 = \frac{1}{2}$$

پس پاسخ درست، گزینهٔ (۲) است.

F-۵- معادلهٔ تحکیم یک بعدی ترزاقی

ما در قسمت سوم این فصل به دنبال محاسبهٔ نشست تحکیم نهایی بودیم و سرعت تحکیم برایمان اهمیت نداشت. حال آنکه در قسمت‌های چهارم و پنجم با مطرح شدن کمیتی به‌نام درجهٔ تحکیم که نماد پیشرفت تحکیم بود، سرعت تحکیم نیز برای ما اهمیت پیدا کرد. ظاهر شدن پارامترهای C_v و H_{dr} و به‌دنبال آن عامل بدون بعد زمان یعنی T_v، همگی در همین راستا بودند و بحث سرعت تحکیم را کامل‌تر کردند.

حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که بحث سرعت تحکیم از کجا آغاز شد و اصولاً ریشهٔ این پارامترها که گفتیم کجاست؟ در جواب باید بگوییم که نخستین تئوری درخصوص سرعت تحکیم یک‌بعدی در خاکهای رسی، در سال ۱۹۲۵ میلادی توسط ترزاقی ارائه شد و او تئوری خود را بر پایهٔ فرضیات زیر قرار داد:

۱- تودهٔ خاک (سیستم آب ـ رس)، همگن، همسان و کاملاً اشباع ($S_r = 100\%$) است.

۲- آب و دانه‌های جامد خاک غیرقابل تراکم هستند.

۳- آب فقط در امتداد قائم (امتداد اعمال بار) در خاک جریان یافته و به‌صورت یک‌بعدی از آن خارج می‌شود و فشردگی خاک نیز در همین امتداد خواهد بود.

۴- درمورد تمام شیب‌های آبی، قانون دارسی $(V = ki)$ برقرار است.

۵- مقادیر تغییرشکل‌ها کوچک هستند، درنتیجه ضریب نفوذپذیری و ضریب تغییرحجم خاک در حین تحکیم تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نداشته و ثابت فرض می‌شوند.

۶- بین نشانهٔ خلاء و تنش مؤثر به‌طور مستقل از زمان، رابطهٔ واحدی وجود دارد.

باتوجه به فرضیات مطرح شده، ترزاقی معادلهٔ زیر را که به **معادلهٔ تحکیم یک‌بعدی ترزاقی** معروف است، ارائه کرد:

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\left(\frac{k}{m_v\gamma_w}\right)\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

رابطهٔ فوق چگونگی تغییرات فشار آب حفره‌ای (u) در یک لایهٔ رسی را با گذشت زمان (t) و در عمق‌های مختلف (z) نشان می‌دهد. ضریب ثابت این معادله یعنی عبارت داخل پرانتز همان C_v است که قبلاً رابطهٔ آن را دیده بودید. پس اگر به‌جای عبارت داخل پرانتز، C_v را قرار دهیم، معادلهٔ ترزاقی به فرم زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial u}{\partial t}=C_v\ \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

معادلهٔ فوق به‌علت داشتن دو متغیر مستقل z و t، یک معادلهٔ دیفرانسیل با مشتقات جزئی است که برای حل آن، مانند هر معادله دیفرانسیل دیگری، نیاز به شرایط مرزی داریم. این شرایط مرزی با دانستن مقادیر اضافه فشار آب حفره‌ای اولیه (درلحظهٔ شروع تحکیم) در مرزهای لایهٔ رسی برقرار می‌شوند.

ما در ادامه نمی‌خواهیم معادله ترزاقی را حل کنیم و فقط به ذکر این نکته اکتفا می‌کنیم که **ضمن حل معادلهٔ ترزاقی، عامل زمان یعنی** T_v **ظاهر می‌شود.**

تمرین ۴۵: کدام عبارت در مورد خاک‌های رسی اشباع صحیح نمی‌باشد؟

۱) در خاک رس عادی تحکیم یافته، چسبندگی خاک ناچیز و تقریباً برابر صفر می‌باشد.

۲) در خاک رس پیش‌تحکیم یافته، درصد رطوبت خاک به مراتب کمتر از خاک رس عادی تحکیم یافته می‌باشد.

۳) اگر یک خاکریز اشباع از خاک رس نرم را به سرعت اجرا کنیم، کمی بعد از خاکریزی $OCR < 1$ است.

۴) بارگذاری و باربرداری روی خاک رس اشباع، همواره باعث افزایش OCR خاک رس می‌شود.

بیایید قبل از بررسی عبارت‌های فوق با دو مفهوم مهم آشنا شوید:

۱- با دانستن درصد رطوبت خاک رس می‌توان در مورد پیش‌تحکیمی آن اظهار نظر کرد به این ترتیب که اگر $\omega \le PL$ باشد ($LI \le 0$)، خاک رس کم آب و پیش تحکیم یافته است ولی اگر $\omega \ge LL$ باشد ($LI \ge 1$)، خاک رس پر آب و عادی تحکیم یافته می‌باشد.

۲- برخلاف آنچه تصور می‌شود، نسبت پیش‌تحکیمی (OCR) می‌تواند از یک هم کمتر باشد، به این ترتیب که اگر یک خاکریز اشباع از خاک رس نرم را به‌سرعت اجرا کرده و بخواهیم ظرف مدت کوتاهی پس از خاکریزی OCR را تعیین کنیم، در این حالت $OCR < 1$ است. علت این موضوع آن است که بلافاصله بعد از اجرای خاکریز، رس اشباع هنوز تحت وزن خود تحکیم نیافته و σ'_c به $\sigma'_v = \gamma' z$ نرسیده است، ولی در ادامه و با خاتمه تحکیمِ خاکریز، درنهایت $OCR = 1$ خواهد شد و می‌گوییم خاک رس تحت اثر وزن خود، به‌صورت عادی (نه بارگذاری) تحکیم یافته است. پس به‌طور خلاصه و در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت:

$$\begin{cases} OCR < 1 & \text{رس در حال تحکیم} \\ OCR = 1 & \text{رس عادی تحکیم یافته} \\ OCR > 1 & \text{رس پیش تحکیم یافته} \end{cases}$$

حالا نوبت بررسی گزینه‌هاست:

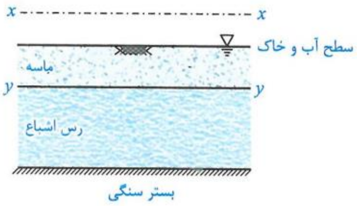
گزینه ۱: خاک رس عادی تحکیم یافته بسیار پر آب بوده ($\omega \ge LL$) و این آب زیاد، چسبندگی رس را از کار می‌اندازد (رطوبت‌های بزرگتر از LL را از فصل دوم بیاد آورید که مقاومت خاک را از بین می‌برند)، بنابراین می‌توان گفت چسبندگی رس عادی تحکیم یافته ناچیز بوده و تقریباً برابر صفر است. یعنی این گزینه درست است.

گزینه ۲: در خاک رس پیش تحکیم به علت بارگذاری قبلی و خروج آب، درصد رطوبت خاک به مقدار قابل توجهی نسبت به حالت عادی تحکیم یافته که پر آب است، کاهش می‌یابد و همین باعث می‌شود تا در رس OC، $\omega \le PL$ و در رس NC، $\omega \ge LL$ باشد. نتیجه آنکه این گزینه هم درست است.

گزینه ۳: با توجه به توضیحات داده شده، این گزینه درست است.

گزینه ۴: طبق نتیجهٔ به‌دست آمده در انتهای تمرین (۱۰) از متن درس، فرآیند بارگذاری و باربرداری روی خاک رس اشباع، زمانی باعث افزایش OCR خاک رس می‌شود که بار وارده بزرگتر از بیشترین باری باشد که تاکنون رس تحمل کرده است. بنابراین این گزینه نادرست بوده و پاسخ تست می‌باشد.

تمرین ۴۶: با توجه به شکل زیر کدام عبارت وضعیت تغییر شکل خاک رس در دراز مدت را درست بیان می‌کند؟



۱) در اثر صعود سطح آب زیرزمینی تا تراز $x-x$، خاک رس متورم می‌شود و با نزول سطح آب تا تراز $y-y$، خاک رس نشست تحکیم خواهد داشت.

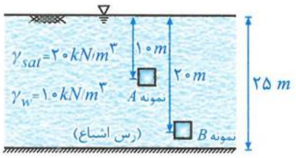
۲) در اثر صعود سطح آب زیرزمینی تا تراز $x-x$، خاک رس دچار تحکیم و تورم نمی‌شود ولی با نزول سطح آب تا تراز $y-y$، متورم خواهد شد.

۳) در اثر صعود سطح آب زیرزمینی تا تراز $x-x$، هیچگونه نشست یا تورمی در رس اتفاق نمی‌افتد ولی در اثر نزول سطح آب تا تراز $y-y$، خاک رس دچار نشست تحکیم می‌شود.

۴) در اثر صعود آب زیرزمینی تا تراز $x-x$، خاک رس متورم می‌شود ولی در اثر نزول سطح آب تا تراز $y-y$، هیچگونه نشست یا تورمی در رس اتفاق نمی‌افتد.

● حل: در تمرین (۴) از متن درس دیدیم که اگر سطح آب در خارج از پروفیل خاک جابه‌جا شود، در آن‌صورت تنش مؤثر تغییر نمی‌کند و تحکیم یا تورمی رخ نمی‌دهد. همچنین می‌دانیم پایین آمدن سطح سفرهٔ آب زیرزمینی در خاک باعث افزایش تنش مؤثر و تحکیم رس می‌گردد. با این توضیحات می‌توان گفت؛ در اثر صعود سطح آب تا تراز $x-x$ هیچگونه نشست یا تورمی در رس اتفاق نمی‌افتد ولی در اثر نزول سطح آب تا تراز $y-y$، خاک رس دچار نشست تحکیمی می‌شود. پس گزینه (۳) جواب درست این تست است.

تمرین ۴۷: یک لایه رس ضخیم و عادی تحکیم‌یافته مطابق شکل زیر مفروض است. دو نمونهٔ A و B از اعماق ۱۰ و ۲۰ متری این خاک به‌صورت دست‌نخورده تهیه کرده و در محفظهٔ دستگاه ادومتر قرار می‌دهیم. با فرض ثابت بودن نسبت تخلخل اولیه در کل لایه:



الف) مقادیر تنش کل، تنش مؤثر و فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها را در دو حالت، یکی بلافاصله و دیگری مدت مدیدی بعد از نمونه‌گیری به‌دست آورید.

ب) اگر نمونه‌ها مدت مدیدی بعد از آمدن به سطح خاک تحت آزمایش ادومتری با فشار سربار یکسان $120\ kN/m^2$ قرار گیرند، در آنصورت نشست تحکیمی کدام نمونه بیشتر خواهد بود؟

● حل:

الف) در فصل پنجم (بحث تنش مؤثر) دیدیم که همواره به هنگام محاسبهٔ تنش کل در یک نقطه بایستی وزن مخصوص خاک‌ها (یا آب تنها) را در ضخامتشان (در بالای نقطهٔ مورد نظر) ضرب کنیم تا σ به‌دست آید و این یعنی حرکت یا عدم حرکت آب در خاک یا بحث دراز مدت و کوتاه مدت، در محاسبهٔ تنش کل مطرح نیست. پس وقتی نمونه‌های A و B به سطح خاک آورده می‌شوند، در هر صورت تنش کل آنها برابر است با:

$$\sigma_{A,B}=\gamma_{sat}\,z \xrightarrow[z=0]{\text{ضخامت نمونه‌ها ناچیز است.}} \sigma_{A,B}\simeq 0$$

اما در مورد محاسبهٔ تنش مؤثر باید بگوییم که بلافاصله بعد از آوردن نمونه‌ها به سطح خاک، تنش مؤثر آنها تغییری نمی‌کند ولی با گذشت زمان تنش مؤثر رفته رفته کم شده تا در نهایت برابر صفر می‌شود. فشار آب حفره‌ای هم که از تفاضل تنش کل و تنش مؤثر به‌دست می‌آید، بنابراین:

● بلافاصله بعد از آوردن نمونه‌ها به سطح خاک

$$\sigma'_A=(\sigma'_0)_A=\gamma' z_A=(20-10)\times 10=100\ kN/m^2 \quad\Rightarrow\quad u_A=\sigma_A-\sigma'_A=0-100=-100\ kN/m^2$$

$$\sigma'_B=(\sigma'_0)_B=\gamma' z_B=(20-10)\times 20=200\ kN/m^2 \quad\Rightarrow\quad u_B=\sigma_B-\sigma'_B=-200\ kN/m^2$$

● مدت مدیدی بعد از آوردن نمونه‌ها به سطح خاک

$$\sigma'_A=\gamma' z \xrightarrow[z=0]{\text{ضخامت نمونه‌ها ناچیز است.}} \sigma'_{A,B}\simeq 0$$

$$u_{A,B}=\sigma_{A,B}-\sigma'_{A,B}=0-0=0$$

ب) نمونه‌ها قبلاً در داخل خاک و به‌علت وزن خاک بالای خود، به‌ترتیب تنش‌های مؤثر $(\sigma'_0)_A=100\ kN/m^2$ و $(\sigma'_0)_B=200\ kN/m^2$ را تحمل کرده بودند و اکنون که به سطح خاک آمده‌اند و بعد از مدت مدیدی تنش‌های مؤثر آنها صفر شده است، در بارگذاری مجدد پیش‌تحکیم‌یافته به حساب می‌آیند در این شرایط می‌توان گفت تنش‌های مؤثر $(\sigma'_0)_A$ و $(\sigma'_0)_B$ به‌ترتیب در حکم تنش‌های پیش‌تحکیمی نمونه‌های A و B خواهند بود:

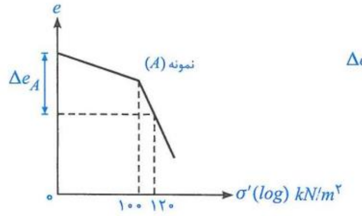
$$(\sigma'_c)_A=100\ kN/m^2 \quad,\quad (\sigma'_c)_B=200\ kN/m^2$$

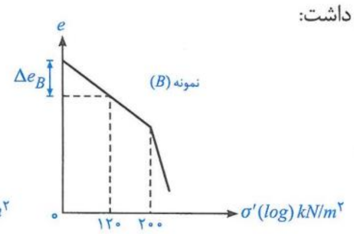
در این حالت تنش‌های مؤثر نهایی هر دو نمونه بعد از بارگذاری یکسان بوده و برابر است با:

$$(\sigma'_f)_A = (\sigma'_f)_B = \sigma'_{\circ} + \Delta\sigma' = \circ + ۱۲۰ = ۱۲۰\ kN/m^۲$$

نمونهٔ کم ضخامت

در ادامه با ترسیم منحنی تحکیم محاسباتی آنها خواهیم داشت:





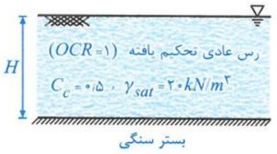
$$\Delta e_A > \Delta e_B \xrightarrow{H_{\circ}\ \text{و}\ e_{\circ}\ \text{یکسان}} \Delta H_A > \Delta H_B$$

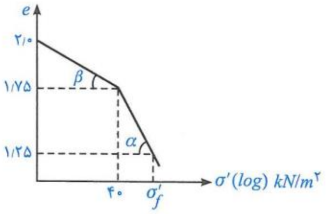
تمرین ۴۸: مطابق شکل زیر، یک لایه رس عادی تحکیم یافته با نسبت تخلخل اولیه $e_{\circ} = ۲/۰$ موجود است. اگر یک نمونه به ضخامت ۲۴ mm را از وسط رس برداشته و تحت آزمایش تحکیم قرار دهیم، در آن‌صورت منحنی تحکیم محاسباتی آن مطابق شکل خواهد بود. با توجه به اطلاعات داده شده در شکل مطلوب است تعیین: ($\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳$)

الف) ضخامت اولیهٔ لایهٔ رسی (H)

ب) تنش مؤثر نهایی (σ'_f)

ج) نشست تحکیمی نمونه آزمایشگاهی (ΔH)





● نمونهٔ رسی وقتی در طبیعت (داخل لایه خاک) بوده است، در اثر وزن قسمت‌های بالای لایه، تنش موثر $\sigma' = \gamma' z = \gamma'(\frac{H}{۲})$ را تحمل کرده است. وقتی نمونه به آزمایشگاه آورده می‌شود، این تنش از روی آن برداشته شده و ضمن تورم نمونه، تنش مذکور به‌عنوان تنش پیش‌تحکیمی آن به حساب می‌آید. با بارگذاری نمونه در آزمایش تحکیم و ترسیم نمودار تحکیم آن، ملاحظه می‌شود که تا تنش پیش تحکیمی $\sigma'_c = ۴۰\ kPa$ شیب نمودار به‌صورت کند و برابر C_r و از آن به بعد شیب نمودار به‌صورت تند و برابر $C_c = ۰/۵$ می‌باشد.

حال با توجه به توضیحات فوق به حل قسمت‌های مختلف این تمرین می‌پردازیم:

الف) خاک رس عادی تحکیم یافته است، بنابراین می‌توان گفت:

$$OCR = ۱ \Rightarrow \sigma'_c = \sigma'_{\circ} = \gamma'(\frac{H}{۲}) \Rightarrow ۴۰ = (۲۰ - ۱۰) \times (\frac{H}{۲}) \Rightarrow H = ۸\ m$$

ب)

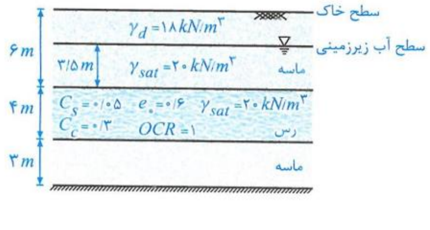
$$C_c = \tan\alpha = \frac{\Delta e\ \text{قسمت پر شیب}}{\log\sigma'_f - \log\sigma'_c} \Rightarrow ۰/۵ = \frac{۱/۷۵ - ۱/۲۵}{\log(\frac{\sigma'_f}{۴۰})} \Rightarrow \sigma'_f = ۴۰۰\ kPa$$

ج)

$$\frac{\Delta H}{H_{\circ}} = \frac{\Delta e}{۱ + e_{\circ}} \Rightarrow \frac{\Delta H}{۲۴} = \frac{۲ - ۱/۲۵}{۱ + ۲} \Rightarrow \Delta H = ۶\ mm$$

ضخامت نمونهٔ آزمایشگاهی

تمرین ۴۹: باتوجه به پروفیل شکل زیر، صعود سطح آب زیرزمینی تا سطح خاک چقدر ضخامت لایه رسی را تغییر می‌دهد؟ ($\log ۱/۲۵ = ۰/۱$)



۱) ۱/۲۵ cm افزایش می‌دهد.

۲) ۱/۲۵ cm کاهش می‌دهد.

۳) ۷/۵ cm افزایش می‌دهد.

۴) ۷/۵ cm کاهش می‌دهد.

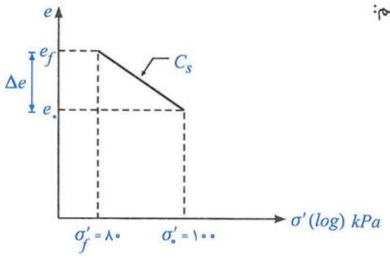
پاسخ: طبق مطالب قسمت اول فصل می‌دانیم صعود سطح آب در داخل خاک، باعث کاهش تنش مؤثر و در نتیجه تورم خاک رس می‌شود. برای محاسبهٔ میزان تغییر ضخامت در اثر تورم، مثل مسائل تحکیم عمل کرده و چون ضرایب تحکیم خاک داده شده‌اند، از نمودار تحکیم استفاده می‌کنیم. توجه کنید که در محاسبات تورم، باید قسمت کم شیب نمودار (با شیب $C_r = C_s$) را در نظر بگیریم. در چنین شرایطی، عادی و یا پیش‌تحکیم یافته بودن خاک رس (آنچه در گام اول بررسی می‌کردیم) اهمیتی ندارد. پس حل را از گام دوم شروع می‌کنیم:

گام دوم: تنش‌های $\sigma'_\circ$ و σ'_f را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\sigma'_\circ = \sum(\gamma' z)_i = \underbrace{18\times(6-3/5)}_{\text{ماسهٔ خشک}} + \underbrace{(20-10)\times 3/5}_{\text{ماسهٔ اشباع}} + \underbrace{(20-10)\times\frac{4}{2}}_{\text{وسط لایهٔ رسی}} = 45+35+20 = 100\,kPa \quad \text{(قبل از بالا رفتن آب)}$$

$$\sigma'_f = \sum(\gamma' z)_i = \underbrace{(20-10)\times 6}_{\text{ماسه کاملاً اشباع شده است.}} + (20-10)\times\frac{4}{2} = 80\,kPa \quad \text{(بعد از بالا رفتن آب)}$$

گام سوم: حال نمودار تحکیم خاک را طبق توضیحات ابتدای حل و به‌صورت زیر رسم می‌کنیم:



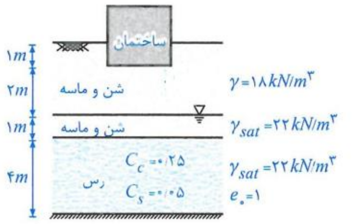
گام چهارم: با توجه به نمودار رسم شده، Δe خاک برابر می‌شود با:

$$\Delta e = C_s \log\frac{\sigma'_\circ}{\sigma'_f} = 0/05\times \underbrace{\log\frac{100}{80}}_{\log 1/25 = 0/1} = 0/05\times 0/1 = 0/005$$

گام پنجم: در نهایت با استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل، ΔH (افزایش ضخامت ناشی از تورم خاک) را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{1+e_\circ}\Delta e = \frac{400}{1+0/6}\times 0/005 = 1/25\ cm$$

تمرین ۵۰: در شکل مقابل ابتدا $1m$ گودبرداری انجام شده و سپس ساختمانی با پی گسترده به ابعاد $10m \times 10m$ در آن اجرا می‌شود. می‌دانیم فشار یکنواخت ایجاد شده در زیر پی $108\,kPa$ است. در این صورت نشست تحکیم لایهٔ رسی چقدر خواهد بود؟



پاسخ: نکتهٔ مهم در این سؤال آن است که در اثر خاک‌برداری (قبل از احداث پروژه) خاک رسی پیش‌تحکیم‌یافته می‌شود. بنابراین با توجه به آنکه ضرایب C_c و C_s داده شده‌اند، از روش رسم نمودار تحکیم استفاده می‌کنیم.

گام اول: همانطور که گفته شد، خاک رس از نوع پیش‌تحکیم یافته است. همچنین تنش‌های σ'_c و $\sigma'_\circ$ در وسط رس برابر هستند با:

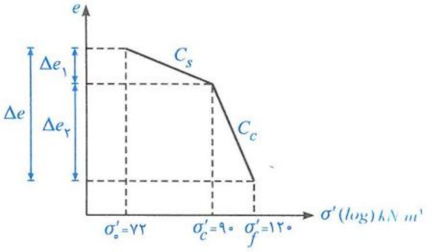
$$\text{قبل از خاکبرداری}: \sigma'_c = \sum(\gamma' z)_i = 18\times 3 + (22-10)\times 1 + (22-10)\times\frac{4}{2} = 90\,kPa$$

$$\text{بعد از خاکبرداری}: \sigma'_\circ = \sum(\gamma' z)_i = 18\times 2 + (22-10)\times 1 + (22-10)\times\frac{4}{2} = 72\,kPa$$

گام دوم: تنش مؤثر نهایی در وسط رس برابر می‌شود با:

$$\begin{cases} \sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' \\ \text{با توجه به روش تقریبی ۲ به ۱}: \Delta\sigma' = \dfrac{B^2}{(B+\underbrace{z}_{\text{فاصلهٔ وسط لایهٔ رس از زیر پی} = 2+1+\frac{4}{2} = 5\,m})^2}q = \dfrac{10^2\times 108}{(10+5)^2} = 48\,kPa \end{cases} \Rightarrow \sigma'_f = 72+48 = 120\,kPa$$

گام سوم: با توجه به پیش تحکیم یافته بودن خاک رس و اینکه $\sigma'_f > \sigma'_c$ شده است، نمودار تحکیم این خاک را به‌صورت زیر رسم می‌کنیم:



گام چهارم: مقدار Δe از روی نمودار به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta e = \Delta e_1 + \Delta e_2 = C_s\ log\,(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ}) + C_c\ log\,(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c})$$

$\to log\,\frac{۴}{۳}$ [illegible]

$$= ۰/۰۵ \times \boxed{log\,\frac{۹۰}{۷۲}} + ۰/۲۵ \times \boxed{log\,\frac{۱۲۰}{۹۰}}$$

$\to log\,\frac{۵}{۴} = log\,۱/۲۵ = ۰/۱$

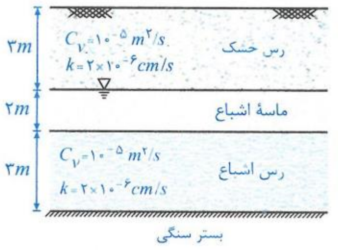
$$\Rightarrow\ \Delta e = ۰/۰۵ \times ۰/۱ + ۰/۲۵ \times ۰/۱ = ۰/۰۳$$

گام پنجم:

در نهایت مقدار نشست تحکیم خاک برابر می‌شود با:

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{1+e_\circ}\,\Delta e = \frac{۴}{۱+۱} \times ۰/۰۳ = ۰/۰۶\ m = ۶\ cm$$

تمرین ۱۰: **مطابق شکل زیر یک خاکریز گسترده (در مقیاس وسیع) به وزن مخصوص ۲۰ kN/m^3 و ارتفاع ۲ متر بر روی سطح زمین اعمال می‌شود. نشست سطح زمین در اثر تحکیم چند mm است؟**



۱) ۸۴
۲) ۶۰
۳) ۳۶
۴) ۲۴

ابتدا نشست تحکیم لایه رس پایینی را محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{cases} \Delta H = H_\circ\, m_v\, \Delta\sigma' \\ C_v = \dfrac{k}{m_v\,\gamma_w} \Rightarrow ۱۰^{-۵} = \dfrac{۲\times۱۰^{-۶}\times۱۰^{-۲}}{m_v\times۱۰} \Rightarrow m_v = ۲\times۱۰^{-۴}\ m^2/kN \\ H_\circ = ۳\ m \quad , \quad \Delta\sigma' = \gamma H = ۲۰\times۲ = ۴۰\ kN/m^2 \end{cases}$$

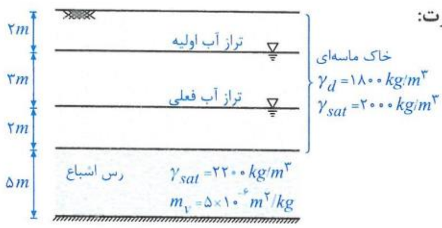
$$\Rightarrow\ \Delta H = ۳\times(۲\times۱۰^{-۴})\times۴۰ = ۰/۰۲۴\ m = ۲۴\ mm$$

شاید اکنون به این فکر می‌کنید که بایستی برای رس بالایی نیز همین مراحل را طی کنید و نشست آن را به‌دست آورده و با ۲۴ mm جمع کنید. اما اشتباه نکنید! رس بالایی خشک است و نشست تحکیم ندارد، پس نشست سطح زمین در اثر تحکیم، تنها در اثر نشست تحکیمی رس اشباعِ پایینی بوده و برابر همان ۲۴ mm است. یعنی گزینهٔ (۴) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۵۲: در زمینی مطابق شکل مقابل، سطح آب ۳ متر پایین برده می‌شود. در این‌صورت:

الف) نشست تحکیمی لایهٔ رس چند cm است؟

ب) در اثر تحکیم چند lit آب از هر m^3 از خاک رسی خارج می‌شود؟



حل:

الف) جهت محاسبهٔ نشست تحکیم، چون ضریب m_v داده شده است می‌نویسیم:

$$\Delta H = H_\circ m_v \Delta\sigma'$$

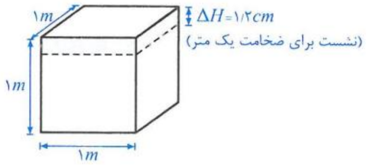
$$\Delta\sigma' = (\gamma_d - \gamma')\Delta h = [1800-(2000-1000)]\times 3 = 2400\ kg/m^2$$

($\gamma_d - \gamma'$: خاک ماسه‌ای؛ Δh: تغییر تراز آب)

$$\Delta H = 5\times5\times10^{-6}\times2400 = 0.06\ m = 6\ cm$$

ب) وقتی در لایهٔ رسی به ضخامت $5\ m$، $6\ cm$ نشست رخ می‌دهد، پس در هر متر ضخامت این لایه، $\frac{6}{5} = 1.2\ cm$ نشست رخ خواهد داد.

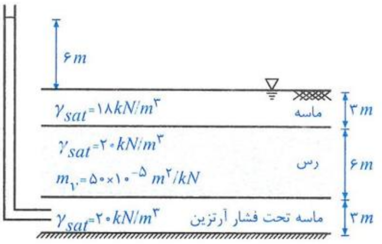
بدین ترتیب مقدار کاهش حجم هر متر مکعب از خاک رس برابر می‌شود با:



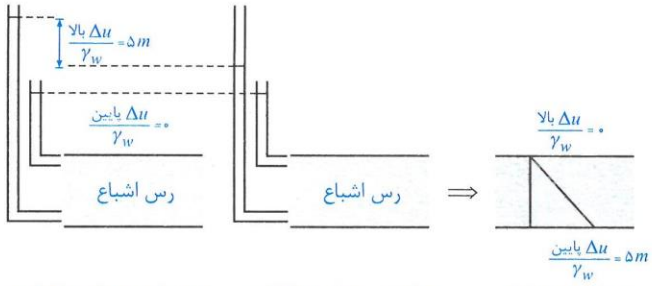
$$\Delta\forall = A\,\Delta H = 1\times1\times0.012 = 0.012\ m^3 = 12\ lit$$

حجم کاهش یافتهٔ فوق، در واقع همان مقدارِ آب خارج شده از هر m^3 از این خاک است.

تمرین ۵۳: یک لایهٔ رس عادی‌تحکیم‌یافته به ضخامت ۶ متر، مطابق شکل بین دو لایهٔ ماسه‌ای قرارگرفته است. لایهٔ ماسهٔ زیرین تحت فشار آرتزین است و تراز پیزومتری آن ۶ متر بالاتر از سطح زمین قرار دارد. اگر سطح آب در لایهٔ ماسهٔ زیرین به‌طور مداوم به میزان ۵ متر پایین آورده شود، در آن‌صورت تغییرمکان تحکیمی لایه رس چقدر است؟ این تغییرمکان نشست تحکیم است یا تورم؟ ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$)

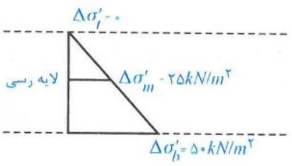


حل: بیایید ابتدا ترازهای پیزومتری در پایین و بالای لایهٔ رسی را قبل و بعد از افت سطح آب در لایه آرتزین نشان دهیم:



قبل از افت سطح آب در لایهٔ آرتزین — بعد از افت سطح آب در لایهٔ آرتزین — نمودار کاهش فشار آب حفره‌ای در کل لایهٔ رسی

همانطور که ملاحظه می‌کنید کاهش فشار آب حفره‌ای در لایهٔ رسی از قسمت پایین آن ($bottom$) شروع می‌شود و در قسمت بالایی لایه (top) خاتمه پیدا می‌کند که نتیجهٔ آن افزایش تنش مؤثر در وسط لایه رسی ($middle$) و تحکیم خاک رس است. برای محاسبهٔ افزایش تنش مؤثر در وسط لایه رسی به‌ترتیب زیر عمل می‌کنیم:



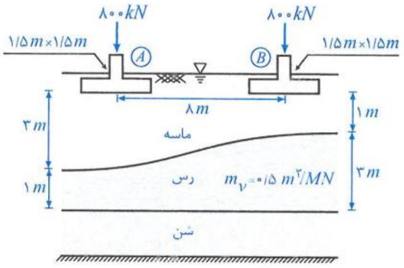
$$\begin{cases}\Delta\sigma'_t = \Delta u_t = 0\\ \Delta\sigma'_b = \Delta u_b = 5\times10 = 50\ kN/m^2\end{cases} \Rightarrow \Delta\sigma'_m = \frac{50+0}{2} = 25\ kN/m^2$$

و در نهایت نشست تحکیم لایه رسی برابر است با:

$$\Delta H = m_v H_\circ \Delta\sigma' = (۵۰\times ۱۰^{-۵})\times(\underbrace{۶۰۰}_{H_\circ = ۶\,m = ۶۰۰\,cm})\times(۲۵) = ۷/۵\ cm$$

توجه: اگر سطح آب در لایهٔ آرتزین بالا برده می‌شد، در آنصورت با افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش تنش مؤثر در لایهٔ رس مواجه می‌شدیم که نتیجهٔ آن تورم لایهٔ رسی بود.

تمرین ۵۴: درشکل زیر دو پی مشابه نشان داده شده‌اند که بار ستون‌های یک ساختمان را به زمین منتقل می‌کنند. به‌علت ناکافی بودن مطالعات ژئوتکنیکی، ضخامت لایه رس، یکنواخت و برابر یک متر فرض شده و طراحی پی نیز بر همین اساس صورت گرفته است. بعد از گذشت دو سال، ساختمان به اندازه ۱۱/۸ mm نشست نامتقارن می‌کند که این امر منجر به ترک خوردن دیوارها می‌گردد. در این حالت درب‌های ساختمان همچنان قابلیت باز و بسته شدن خود را حفظ کرده‌اند ولی با نشست نامتقارن ۲۹/۵ mm، آنها نیز باز و بسته نخواهند شد (به کف، گیر می‌کنند).



مطالعات دقیق‌تر ژئوتکنیک که بعداً انجام می‌شود، پروفیل خاک را به‌شرح شکل مقابل مشخص می‌کند.

الف) با فرض توزیع تقریبی ۲ به ۱ در محاسبه اضافه تنش، نشست تحکیم نامتقارن کل چقدر است؟

ب) چقدر طول می‌کشد تا درب‌ها، قابلیت باز و بسته شدنشان را ازدست دهند؟ ($\pi = ۳$)

پاسخ: ما در این سؤال با یک تمرین جالب و کاربردی مواجه شده‌ایم که برای حل آن:

الف) مشابه با تمرین (۲۵) در متن درس، میزان نشست تحکیم نامتقارن را می‌یابیم:

$$\Delta H_A = (H_\circ)_A \times m_v \times \Delta\sigma'_A \quad , \quad \Delta\sigma'_A = \Delta\sigma'_{z_A} = \frac{P}{(B+z)^۲} = \frac{۸۰۰}{(۱/۵+۳/۵)^۲} = ۳۲\ kN/m^۲$$

$$\Rightarrow \Delta H_A = (۱)(\underbrace{۰/۵\times ۱۰^{-۳}}_{\text{تبدیل } m^۲/MN \text{ به } m^۲/kN})(۳۲) = ۰/۰۱۶\,m = ۱۶\,mm$$

$$\Delta H_B = (H_\circ)_B \times m_v \times \Delta\sigma'_B \quad , \quad \Delta\sigma'_B = \Delta\sigma'_{z_B} = \frac{P}{(B+z)^۲} = \frac{۸۰۰}{(۱/۵+۲/۵)^۲} = ۵۰\ kN/m^۲$$

$$\Rightarrow \Delta H_B = (۳)(\underbrace{۰/۵\times ۱۰^{-۳}}_{\text{تبدیل } m^۲/MN \text{ به } m^۲/kN})(۵۰) = ۰/۰۷۵\,m = ۷۵\,mm$$

$$\Delta H_{AB} = ۷۵ - ۱۶ = ۵۹\,mm$$

ب) طبق اطلاعات صورت مسئله، برای اینکه درب‌ها قابلیت باز و بسته شدنشان را ازدست بدهند بایستی نشست نامتقارن برابر ۲۹/۵mm شود. باتوجه به مقدار نشست نامتقارن کل (۵۹ mm که محاسبه کردیم)، درجه تحکیم نشست نامتقارن در این حالت برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H}{\Delta H_\infty} = \frac{۲۹/۵}{۵۹} = ۰/۵$$

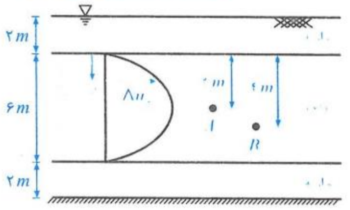
وقتی دوسال از شروع بارگذاری گذشته است میزان نشست نامتقارن پی‌ها برابر ۱۱/۸ mm بوده است، یعنی درجه تحکیم در این لحظه برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H}{\Delta H_\infty} = \frac{۱۱/۸}{۵۹} = ۰/۲$$

از قسمت‌های قبل می‌دانیم که با فرض $U < ۶۰\%$، زمان تحکیم با مجذور درجهٔ تحکیم متوسط متناسب است (بخش $E-۲$، حالت اول)، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{U_۲}{U_۱})^۲ \;\Rightarrow\; \frac{t_۲}{۲} = (\frac{۰/۵}{۰/۲})^۲ \;\Rightarrow\; t_۲ = ۱۲/۵ \text{ سال}$$

یعنی بعد از ۱۲/۵ سال، نشست تحکیم نامتقارن برابر ۲۹/۵ mm خواهد شد و درب‌ها قابلیت باز و بسته شدن خود را از دست می‌دهند.



تمرین ۵۵: یک لایه رس اشباع به ضخامت ۶ متر، مطابق شکل موجود است. بلافاصله پس از بارگذاری روی سطح خاک، فشار آب حفره‌ای در تمام لایه به اندازه $۳۰ kN/m^۲$ افزایش می‌یابد. اگر منحنی توزیع اضافه فشار آب حفره‌ای در یک لحظه مشخص، مطابق شکل و با معادلهٔ $\Delta u_z = ۱۲z - ۲z^۲$ مشخص شده باشد، در آن‌صورت مطلوب است تعیین:

الف) درجه تحکیم نقاط A و B در این لحظه ب) درجه تحکیم متوسط لایه در لحظه موردنظر

الف)

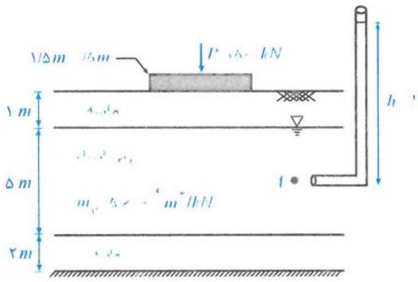
$$U_z(A) = ۱ - \frac{\Delta u_A}{\Delta u_۰} \quad , \quad z_A = ۳\,m \Rightarrow \Delta u_A = ۱۲ \times ۳ - ۲ \times ۳^۲ = ۱۸\,kN/m^۲ \Rightarrow U_z(A) = ۱ - \frac{۱۸}{۳۰} = ۰/۴$$

$$U_z(B) = ۱ - \frac{\Delta u_B}{\Delta u_۰} \quad , \quad z_B = ۴\,m \Rightarrow \Delta u_B = ۱۲ \times ۴ - ۲ \times ۴^۲ = ۱۶\,kN/m^۲ \Rightarrow U_z(B) = ۱ - \frac{۱۶}{۳۰} = ۰/۴۷$$

ب)

$$U = ۱ - \frac{\Delta u_{ave}}{\Delta u_۰} \quad , \quad \Delta u_{ave} = \frac{\int_۰^{H_۰} \Delta u_z\, dz}{H_۰} = \frac{\int_۰^۶ (۱۲z - ۲z^۲)dz}{۶} = \frac{۷۲}{۶} = ۱۲\,kN/m^۲ \Rightarrow U = ۱ - \frac{۱۲}{۳۰} = ۰/۶ = ۶۰٪$$

تمرین ۵۶: مطابق شکل مقابل، در اثر اعمال سریع بار $P = ۱۵۰۰\,kN$ بر یک پی مربعی، لایهٔ رسی زیر پی دچار نشست تحکیمی می‌شود. اگر ۶ ماه پس از بارگذاری میزان نشست برابر $۷/۵cm$ باشد، در آن‌صورت ارتفاع ستون آب در پیزومتری که در نقطهٔ A (وسط لایهٔ رسی) قرار دارد، کدام است؟ (از توزیع تنش تقریبی ۲ به ۱ استفاده کنید و $\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$)



۱) کمتر از ۳ متر

۲) بیشتر از ۵/۵ متر

۳) کمتر از ۵/۵ متر

۴) بیشتر از ۳ متر

ابتدا نشست نهایی لایهٔ رسی را محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{cases} \Delta H = H_۰ \times m_v \times \Delta\sigma' \\ \Delta\sigma' = \Delta\sigma_{z_A} = \dfrac{P}{(B+z)^۲} = \dfrac{۱۵۰۰}{(۱/۵ + ۳/۵)^۲} = ۶۰\,kN/m^۲ \quad \Rightarrow \quad \Delta H = ۵ \times (۵ \times ۱۰^{-۴}) \times ۶۰ = ۰/۱۵\,m = ۱۵\,cm \\ H_۰ = ۵\,m \quad , \quad m_v = ۵ \times ۱۰^{-۴}\,m^۲/kN \end{cases}$$

سپس درجهٔ تحکیم متوسط لایهٔ رسی را در زمان ۶ ماه پس از بارگذاری می‌یابیم:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{۷/۵}{۱۵} = ۰/۵ \text{ یا } ۵۰٪$$

و در ادامه می‌توان اضافه فشار آب حفره‌ای متوسط در لایه را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$U = ۱ - \frac{\Delta u_{ave}}{\Delta u_۰} \Rightarrow ۰/۵ = ۱ - \frac{\Delta u_{ave}}{۶۰} \Rightarrow \Delta u_{ave} = ۳۰\,kN/m^۲$$

طبق مطالب خوانده شده در متن درس (انتهای بخش $D-۳$) اضافه فشار آب حفره‌ای در وسط لایهٔ رسی بیشتر از اضافه فشار آب حفره‌ای متوسط کل لایه است، بنابراین می‌نویسیم:

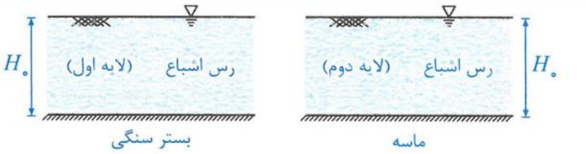
$$\Delta u_{z_A} > \Delta u_{ave} = ۳۰\,kN/m^۲ \Rightarrow \Delta h_A > \frac{\Delta u_{ave}}{\gamma_w} = \frac{۳۰}{۱۰} = ۳\,m$$

اما Δh در نقطهٔ A همان h نمی‌باشد، زیرا h برابر است با:

$$h = h_۰ + \Delta h = ۲/۵ + \Delta h > ۲/۵ + ۳ = ۵/۵\,m$$

بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۵۷: دو لایه خاک رس اشباع، مطـابق شـکل روبـرو مفـروض می‌باشند. ضریب تغییرحجم در هر دو لایه یکسان بـوده و نفوذپـذیری لایه اول، دوبرابر نفوذپـذیری لایـه دوم اسـت. زمـان لازم بـرای ٪۵۰ تحکیم لایه دوم چند برابر زمان لازم برای ٪۲۵ تحکیم لایه اول است؟



حل: از مطالب خوانده شده در متن درس ($E-۲$، حالت سوم) می‌دانیم اگر دو لایه خاک با درجه‌های تحکیم متفاوت داشته باشیم، زمان تحکیم با مجذور H_{dr} و U متناسب بوده و با C_v نسبت عکس دارد، بنابراین می‌نویسیم:

$$t \propto \frac{U^{۲} \times H_{dr}^{۲}}{C_v} \Rightarrow \frac{t_{۲}}{t_{۱}} = (\frac{U_{۲}}{U_{۱}})^{۲} (\frac{H_{dr_{۲}}}{H_{dr_{۱}}})^{۲} (\frac{C_{v_{۱}}}{C_{v_{۲}}})$$

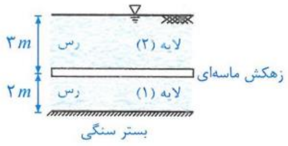
در این سؤال حاصل هر یک از عبارت‌های داخل پرانتز را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$\begin{cases} \frac{U_{۲}}{U_{۱}} = \frac{۵۰}{۲۵} = ۲ \\ \frac{H_{dr_{۲}}}{H_{dr_{۱}}} = \frac{H_{\circ} \times \frac{۱}{۲}}{H_{\circ}} = \frac{۱}{۲} \\ \frac{C_{v_{۱}}}{C_{v_{۲}}} = \frac{(\frac{k_{۱}}{m_v \gamma_w})}{(\frac{k_{۲}}{m_v \gamma_w})} = \frac{k_{۱}}{k_{۲}} = ۲ \end{cases}$$

بنابراین نسبت $\frac{t_{۲}}{t_{۱}}$ که در صورت سؤال خواسته شده است، برابر خواهد بود با:

$$\frac{t_{۲}}{t_{۱}} = (۲)^{۲} \times (\frac{۱}{۲})^{۲} \times (۲) = ۲$$

تمرین ۵۸: نشست تحکیمی کل در نیمرخ شکل زیر، $۵۰ mm$ است. درصد تحکیم متوسط لایه (۲) زمانی کـه نشـست تحکـیم $۹ mm$ اسـت، چقدر می‌باشد؟ مشخصات دو لایه رسی مشابه است.



۱) ٪۷/۵

۲) ٪۲۰

۳) ٪۲۲/۵

۴) ٪۳۰

حل: با فرض $U_{۱}, U_{۲} < ٪۶۰$ و مشابه با تمرین قبل می‌نویسیم:

$$t \propto \frac{U^{۲} \times H_{dr}^{۲}}{C_v} \Rightarrow \frac{t_{۲}}{t_{۱}} = (\frac{U_{۲}}{U_{۱}})^{۲} (\frac{H_{dr_{۲}}}{H_{dr_{۱}}})^{۲} (\frac{C_{v_{۱}}}{C_{v_{۲}}})$$

در زمان مشخص t که برای هر دو لایه یکسان است، هر یک از لایه‌ها درجه‌های تحکیم مربوط به خود یعنی $U_{۱}$ و $U_{۲}$ را دارند. حال با توجه به یکسان بودن مشخصات لایه‌های رسی $(C_{v_{۱}} = C_{v_{۲}})$ خواهیم داشت:

$$t_{۲} = t_{۱} \ , \ C_{v_{۱}} = C_{v_{۲}} \Rightarrow ۱ = (\frac{U_{۲}}{U_{۱}})^{۲} (\frac{۳ \times \frac{۱}{۲}}{۲})^{۲} \Rightarrow U_{۱} = ۰/۷۵ U_{۲}$$

از طرفی درجهٔ تحکیم متوسط کل لایه را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد:

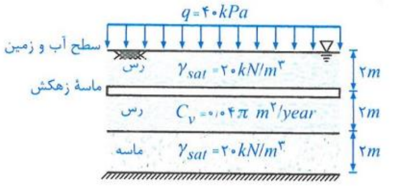
$$\begin{cases} U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{\infty}} = \frac{۹}{۵۰} = ۰/۱۸ \\ U = \frac{U_{۱} H_{۱} + U_{۲} H_{۲}}{H_{۱} + H_{۲}} = \frac{۰/۷۵ U_{۲} \times ۲ + U_{۲} \times ۳}{۲ + ۳} = ۰/۹ U_{۲} \end{cases}$$

که از مساوی هم قرار دادن دو مقدار فوق، $U_{۲}$ به‌دست می‌آید:

$$۰/۹ U_{۲} = ۰/۱۸ \Rightarrow U_{۲} = ۰/۲ \text{ یا } ٪۲۰$$

بنابراین گزینه (۲) صحیح است.

تمرین ۵۹: در شکل زیر یک خاکریز در سطح وسیع و ظرف مدت ۲ سال بر روی لایهٔ رسی اجرا می‌شود و بار $40\ kPa$ را تدریجاً بر سطح خاک اعمال می‌کند. اگر در پایان اجرای خاکریز، $4cm$ نشست تحکیمی در لایهٔ رسی رخ داده باشد، در آن‌صورت میزان نشست در پایان تحکیم و ضریب تغییر حجم m_v به‌ترتیب کدامند؟



۱) $20\ cm$ و $6/25\times10^{-4}\ (kPa)^{-1}$

۲) $10\ cm$ و $6/25\times10^{-4}\ (kPa)^{-1}$

۳) $20\ cm$ و $1/25\times10^{-3}\ (kPa)^{-1}$

۴) $10\ cm$ و $1/25\times10^{-3}\ (kPa)^{-1}$

پاسخ: چون بار وارده به‌صورت مدت‌دار و تدریجی اعمال شده است، بنابراین برای محاسبات مربوط بـه نشست تحکیم (در حین تحکیم) بایستی از زمان اصلاح شدهٔ t_m استفاده کنیم:

$$t = t_c = 2 \text{ سال} \Rightarrow t_m = \frac{t}{2} = \frac{2}{2} = 1 \text{ سال}$$

$$T_v = \frac{C_v\, t_m}{H_{dr}^2} = \frac{0/04\pi \times 1}{(2\times\frac{1}{2})^2} = 0/04\pi$$

توجه کنید که هر دو لایهٔ رسی، کاملاً مشابه بوده و از دو طرف زهکشی می‌شوند و لذا $H_{dr} = \frac{1}{2}H$ شده است.

$$T_v = \frac{\pi}{4}U^2 \Rightarrow 0/04\pi = \frac{\pi}{4}U^2 \Rightarrow U = 0/4 < 0/6 \quad O.K.$$

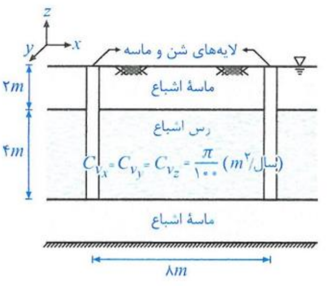
$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow 0/4 = \frac{4}{\Delta H_\infty} \Rightarrow \Delta H_\infty = 10\ cm$$

$$\Delta H_\infty = H_\circ\, m_v\, \Delta\sigma' \Rightarrow 0/1 = 4\times m_v \times 40 \Rightarrow m_v = 6/25\times10^{-4}\ (kPa)^{-1}$$

$10\ cm = 0/1\ m$

همانطور که ملاحظه می‌کنید گزینه (۲) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۶۰: در شکل زیر در فواصل $8\,m \times 8\,m$ در دو امتداد y و x، کنده‌کاری‌های قائم انجام شده و فضای خالی با مصالح شن و ماسهٔ تمیز پر شده است. در اثر بارگذاری بر روی لایهٔ خاک، پس از ۴ سال چند درصد از تحکیم اتفاق می‌افتد؟



پاسخ: می‌دانیم در زهکشی سه‌طرفه، درصد تحکیم برابر می‌شود با:

$$\bar{U} = 1-(1-U_x)(1-U_y)(1-U_z)$$

حال برای هر جهت ابتدا T_v و سپس U را محاسبه می‌کنیم.

جهت x و y: در این دو امتداد، زهکشی دوطرفه و $H_{dr} = \frac{H}{2} = \frac{8}{2} = 4\,m$ می‌باشد. بنابراین می‌نویسیم:

$$T_{v_{x,y}} = \frac{C_{v_{x,y}}\, t}{H_{dr}^2} = \frac{\frac{\pi}{100}\times 4}{4^2} = \frac{\pi}{400}$$

$$T_{v_{x,y}} = \frac{\pi}{4}U_{x,y}^2 \Rightarrow \frac{\pi}{400} = \frac{\pi}{4}U_{x,y}^2 \Rightarrow U_{x,y} = 0/1$$

- **جهت z:** در این امتداد نیز زهکشی دوطرفه بوده و $H_{dr} = \frac{H}{۲} = \frac{۴}{۲} = ۲\,m$ می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

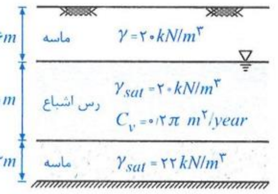
$$T_{v_z} = \frac{C_{v_z}\,t}{H_{dr}^{۲}} = \frac{\frac{\pi}{۱۰۰}\times ۴}{۲^{۲}} = \frac{\pi}{۱۰۰}$$

$$T_{v_z} = \frac{\pi}{۴}U_z^{۲} \;\Rightarrow\; \frac{\pi}{۱۰۰} = \frac{\pi}{۴}U_z^{۲} \;\Rightarrow\; U_z = ۰/۲$$

در نهایت درصد پیشرفت تحکیم پس از ۴ سال برابر می‌شود با:

$$\overline{U} = ۱-(۱-۰/۱)\times(۱-۰/۱)\times(۱-۰/۲) = ۰/۳۵۲ \quad \text{یا} \quad ۳۵/۲\%$$

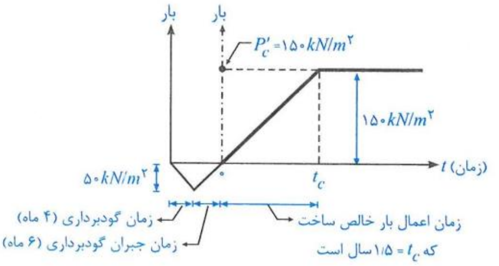
تمرین ۶۱: در پروفیل شکل زیر، جهت احداث یک ساختمان اداری، ۲/۵ متر گودبرداری ظرف مدت ۴ ماه انجام می‌شود و سپس بار سازه در یک سطح گسترده با شدت ۲۰۰ kPa در طول ۲ سال اعمال می‌گردد. اگر نشست تحکیم نهایی خاک ۲۰cm باشد، با فرض خطی بودن تغییرات اعمال بار با زمان، نشست خاک رس ۶ ماه پس از پایان ساخت سازه چند cm است؟



- معمولاً در عملیات ساخت سازه، به‌علت گودبرداری انجام شده و کاهش سربار، خاک رس متورم می‌شود و تا زمانی‌که میـزان بـار وارد شده توسط سازه از وزن خاک برداشته شده بیشتر نشود، خاک رس نشست جدیدی را تجربه نمی‌کند. بنابراین در محاسبهٔ نشسـت تحکیـم بایستی از **بار خالص ساخت** یعنی **بار سازه منهای بار گودبرداری** استفاده کنیم. در این سؤال کاهش سربار ناشی از گودبرداری برابر است با:

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma = ۲۰\times ۲/۵ = ۵۰\;kN/m^{۲}$$

حال با توجه به توضیحات بالا می‌توانیم نمودار بار - زمان را برای این بارگذاری به‌صورت زیر ترسیم کنیم:



همانطور که ملاحظه می‌کنید با احتساب زمان جبران گودبرداری، زمان ساخت خالص سازه برابر سال $t_c = ۱/۵$ خواهد شد، یعنی ۶ ماه کمتر از زمان کل ساخت سازه. توجه کنید که این موضوع برای کلیهٔ زمان‌های مورد نیاز در حل مسئله نیز برقرار است، بنابراین زمان خواسته شده در این سؤال (یعنی ۶ ماه پس از ساخت سازه) برابر است با:

$$t = \text{ماه } ۶ + \text{خالص } t_c = ۰/۵ + ۱/۵ = ۲ \text{ سال}$$

حال با توجه به تدریجی بودن بارگذاری، t_m را محاسبه کرده و براساس آن مقدار نشست تحکیم را می‌یابیم:

$$t = ۲\text{ سال} > t_c = ۱/۵\text{ سال} \;\Rightarrow\; t_m = t - \frac{t_c}{۲} = ۲ - \frac{۱/۵}{۲} = ۱/۲۵\text{ سال}$$

$$T_v = \frac{C_v\,t_m}{H_{dr}^{۲}} = \frac{۰/۲\pi\times ۱/۲۵}{(۱۰\times\frac{۱}{۲})^{۲}} = ۰/۰۱\pi$$

$$T_v = \frac{\pi}{۴}U^{۲} \;\Rightarrow\; ۰/۰۱\pi = \frac{\pi}{۴}U^{۲} \;\Rightarrow\; U = ۰/۲ < ۰/۶\; O.K.$$

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \;\Rightarrow\; \Delta H_t = U\times\Delta H_\infty = ۰/۲\times ۲۰ = ۴\,cm$$

تمرین ۶۲: یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۴ متر، چگالی دانه‌های جامد $G_s = 2/5$ و میزان رطوبت ۰/۴ موجود است. اگر نشست تحکیمی این لایه دراثر بارگذاری گسترده در سطح آن ۲۰ cm بوده و ظرف مدت یکسال رخ دهد، در آنصورت تراکم ثانویه لایه مذکور ۹ سال پس از خاتمه تحکیم اولیه چند cm خواهد بود؟ $(C_\alpha = 0/038)$

● حل: ابتدا با استفاده از روابط وزنی و حجمی، $e_\circ$ را به‌دست آورده و سپس از رابطه کلی تغییر شکل، e_f (نسبت تخلخل در پایان تحکیم اولیه) را می‌یابیم:

$$\omega G_s = S_r e \xrightarrow{S_r = 1} 0/4 \times 2/5 = 1 \times e_\circ \Rightarrow e_\circ = 1$$: قبل از بارگذاری

$$\Delta H_c = H_\circ \left(\frac{e_\circ - e_f}{1 + e_\circ}\right) \Rightarrow 0/2 = 4\left(\frac{1 - e_f}{1+1}\right) \Rightarrow e_f = 0/9$$

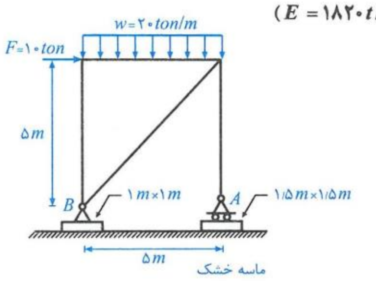
حال با استفاده از رابطهٔ تحکیم ثانویه، نشست ΔH_s را می‌یابیم:

$$\Delta H_s = \frac{H_\circ}{1 + e_p} C_\alpha \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad , \quad e_p = e_f \Rightarrow \Delta H_s = \frac{400}{1 + 0/9} \times 0/038 \times \log\left(\frac{9+1}{1}\right) = 8 \log 10 = 8\ cm$$

توجه: براساس نظر ترزاقی و با استفاده از $e_\circ$ به‌جای e_p (هر چند اشتباه)، محاسبهٔ تراکم ثانویه به‌صورت زیر خواهد شد.

$$\Delta H_s = \frac{H_\circ}{1 + e_\circ} C_\alpha \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \frac{400}{1+1} \times 0/038 \times \log\left(\frac{9+1}{1}\right) = 7/6\ cm$$

تمرین ۶۳: برای قاب بادبندی شدهٔ شکل زیر با اتصالات مفصلی، قرار است دو پی مربعی مجزا در زیر تکیه‌گاه‌های A و B طراحی شود. اگر پی‌ها بدون عمق مدفون باشند، نشست نامتقارن قاب چند mm خواهد بود؟ $(E = 1820\ t/m^2 ، \mu = 0/3 ، I_P = 0/9)$



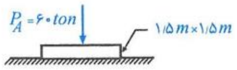
۱) ۶
۲) ۹
۳) ۱۲
۴) هیچگونه نشست نامتقارنی رخ نمی‌دهد.

● حل: ابتدا با نوشتن رابطهٔ تعادل لنگرها حول مفصل B نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاه A را می‌یابیم و در ادامه با نوشتن رابطه تعادل نیروها در امتداد قائم، نیروی عکس‌العمل تکیه B را به‌دست می‌آوریم:

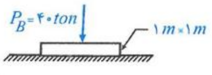
$$\sum M_B = 0 \Rightarrow 10 \times 5 + (20 \times 5) \times 2/5 = R_{y_A} \times 5 \Rightarrow R_{y_A} = 60\ ton$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow 20 \times 5 = R_{y_B} + 60 \Rightarrow R_{y_B} = 40\ ton$$

این نیروها در واقع عکس‌العمل نیروهای وارد بر پی‌های قرار گرفته در زیر تکیه‌گاه‌های A و B هستند، بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع، نشست الاستیک در زیر هر یک از پی‌ها را محاسبه می‌کنیم:



$$(\delta_e)_A = qB\left(\frac{1 - \mu_s^2}{E_s}\right) I_P = \frac{60}{1/5 \times 1/5} \times 1/5 \times \left(\frac{1 - 0/3^2}{1820}\right) \times 0/9 = 0/018\ m = 18\ mm$$



$$(\delta_e)_B = qB\left(\frac{1 - \mu_s^2}{E_s}\right) I_P = \frac{40}{1 \times 1} \times 1 \times \left(\frac{1 - 0/3^2}{1820}\right) \times 0/9 = 0/018\ m = 18\ mm$$

و در نهایت نشست نامتقارن قاب که در واقع اختلاف نشست الاستیک دو پی است، برابر مقدار زیر می‌باشد:

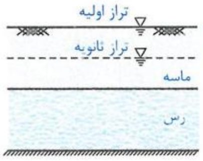
$$(\delta_e)_{AB} = (\delta_e)_B - (\delta_e)_A = 18 - 18 = 0$$

یعنی هیچگونه نشست نامتقارنی در قاب رخ نمی‌دهد و گزینه (۴) صحیح است.

توجه: خاک زیر پی دانه‌ای است (ماسهٔ خشک) و فقط نشست الاستیک در آن رخ می‌دهد.

تست‌های فصل هفتم

۱- جهت گودبرداری برای عملیات ساختمانی، آب زیرزمینی با پمپاژ $4m$ پایین آورده شده است. در این حالت: (سراسری - ۸۷)

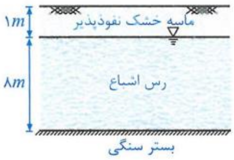


۱) تنش مؤثر در لایه رسی افزایش یافته و سطح زمین محل نشست می‌کند.
۲) تنش مؤثر در لایه رسی کاهش یافته و سطح زمین محل برآمدگی پیدا می‌کند.
۳) تنش کل در لایه رسی افزایش یافته و سطح زمین محل نشست می‌کند.
۴) تنش کل در لایه رسی کاهش یافته و سطح زمین محل برآمدگی پیدا می‌کند.

۲- در زیر یک پی، لایه‌ای از خاک رس غیراشباع ($S_r = ۳۰\%$) به ضخامت ۴/۵ متر وجود دارد. در زیر آن لایه ماسهٔ شـن‌دار ($S_r = ۰/۸۵$) بـه ضخامت ۵/۵ متر و در زیر آن یک لایه رس ($S_r = ۸۵\%$) به ضخامت حدود ۷ متر وجود دارد. نشست هریک از این لایه‌ها در اثـر بـار پـی چگونه خواهد بود؟ (سراسری - ۸۷)

۱) لایه رس غیراشباع نشست تحکیمی، لایه ماسه‌ای نشست آنی، لایه رس نشست تحکیمی
۲) لایه رس غیراشباع نشست تحکیمی، لایه ماسه‌ای نشست تحکیمی، لایه رس نشست تحکیمی و آنی
۳) لایه رس غیراشباع نشست آنی، لایه ماسه‌ای نشست آنی، لایه رس نشست تحکیمی
۴) لایه رس غیراشباع نشست آنی، لایه ماسه‌ای نشست آنی، لایه رس نشست تحکیمی و آنی

۳- پروفیل خاک منطقه‌ای مطابق شکل می‌باشد. اگر بارندگی در طول سال در این منطقه بسیار زیاد باشد، کدام گزینه در مورد لایهٔ رس صحیح است؟ از موئینگی صرف‌نظر کنید. در ضمن خاک منطقه قبلاً تحت هیچگونه بارگذاری قرار نداشته است.



۱) در وضعیت موجود خاک رس می‌تواند عادی تحکیم یافته یا پیش تحکیم یافته باشد.
۲) در ایام بارندگی، خاک رس پیش‌تحکیم یافته می‌باشد.
۳) بارندگی تأثیری بر OCR خاک رس نداشته و همواره $OCR > ۱$ است.
۴) وقوع بارندگی باعث سنگین‌تر شدن خاک رس و در نتیجه نشست آن می‌شود.

۴- برروی یک لایه رس عادی‌تحکیم‌یافته به ضخامت معلوم، به سرعت یک خاکریز اجرا می‌شود. پس از تحکیم کامل لایه رسی که معادل ۱۰ cm نشست است، خاکریز برداشته می‌شود و سپس بعد از گذشت زمانی طولانی، عملیات ساختمانی شروع شده و به سرعت به اتمام می‌رسد بـه طوری که افزایش تنش در وسط لایه رسی برابر با افزایش تنش ناشی از اجرای خاکریز می‌گردد. درمورد نشست تحکیمی لایه رسـی، مـدت مدیدی پس از اتمام عملیات ساختمانی می‌توان گفت:

۱) کمتر از ۱۰ cm است. ۲) بیشتر از ۱۰ cm است. ۳) برابر ۱۰ cm است. ۴) نشستی اتفاق نمی‌افتد.

۵- ضخامت یک لایه رس ۳ متر و نشانه خلاء آن $e = ۰/۷۵$ می‌باشد. لایه مذکور تحت یک بار گسترده یکنواخت تحکـیم پیـدا کـرده اسـت و ضخامت آن به ۲/۷ متر می‌رسد. نشانه خلاء پس از تحکیم چه مقدار است؟ (سراسری - ۷۸)

۱) $e = ۰/۴۴$ ۲) $e = ۰/۵۸$ ۳) $e = ۰/۶۸$ ۴) $e = ۱/۵۸$

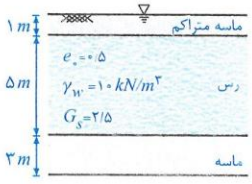
۶- رطوبت یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۲ متر که برروی یک بستر مسطح سنگی قرار گرفته است، ۴۰٪ و وزن واحد حجـم اشـباع آن (دانسیته اشباع) ۱۷/۵ $kN/m^۳$ است. اگر چنانچه در اثر یک بارگذاری گسترده نسبت تخلخل آن به ۹۵٪ مقدار اولیه کاهش یابد، چند cm نشست رخ می‌دهد؟ ($G_s = ۲/۵$) (سراسری - ۷۷)

۱) $\Delta H = ۲\ cm$ ۲) $\Delta H = ۳/۵\ cm$ ۳) $\Delta H = ۵\ cm$ ۴) $\Delta H = ۱۰\ cm$

۷- در انتهای آزمایش تحکیم، رطوبت نهایی نمونه $\omega = ۱۰\%$ و تغییر ضخامت نسبی آن $\varepsilon = ۰/۰۵$ اندازه‌گیری شـده اسـت. چنانچـه $G_s = ۲/۵$ فرض گردد، درصد پوکی (نشانه خلاء) اولیه $e_۰$ حدوداً برابر است با: (سراسری - ۸۵)

۱) ۰/۱۸ ۲) ۰/۳۲ ۳) ۰/۴۰ ۴) ۰/۶۴

۸- در شکل روبرو، لایهٔ خاک رس اشباع پس از تکمیل تحکیم اولیه، ۵۰ سانتی‌متر نشست می‌کنـد. وزن مخصوص اشباع خاک پس از اتمام تحکیم کدام است؟



۱) ۲۱/۱ $kN/m^۳$ ۲) ۱۹ $kN/m^۳$
۳) ۲۲/۵ $kN/m^۳$ ۴) ۲۰ $kN/m^۳$

۹- یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۶ متر، چگالی دانه‌های جامد $G_s = ۲/۶$ و وزن مخصوص اشباع $۱۸\ kN/m^۳$ موجود است. چنانچه لایهٔ مذکور تحت بار گستردهٔ یکنواخت، $۳۰\ cm$ نشست تحکیمی داشته باشد، تعیین کنید پوکی این خاک در خاتمه تحکیم چقدر تغییر کرده است؟

۱) ۰/۰۳، کاهش ۲) ۰/۰۳، افزایش ۳) ۰/۱، افزایش ۴) ۰/۱، کاهش

۱۰- وزن مخصوص یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۳/۳ متر، پس از بارگذاری و در اثر نشست تحکیمی این لایه، ۵ درصد افزایش داشته است. چنانچه نشانه خلاء اولیه نمونه برابر $e_۰ = ۰/۶۵$ باشد، نشست تحکیمی این لایه چند سانتی‌متر است؟ $(G_s = ۲/۶۵)$

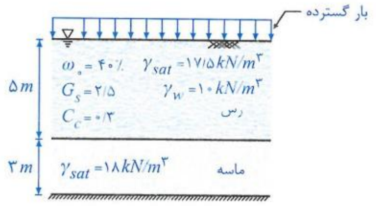
۱) ۲۰ ۲) ۲۵ ۳) ۳۰ ۴) ۳۵

۱۱- رابطه $S_e = C_c \frac{H}{1+e_۰} \log\left(\frac{P' + \Delta P}{P'}\right)$ نشان دهنده میزان نشست تحکیمی لایه رس اشباع با تخلخل اولیه $e_۰$ می‌باشد. در این رابطه H:

(سراسری - ۸۶)

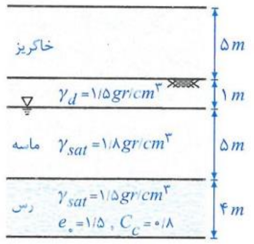
۱) ضخامت کل لایه بدون توجه به الگوی زهکشی می‌باشد.
۲) ضخامت کل لایه می‌باشد فقط در صورتی که زهکشی یکطرفه باشد.
۳) ضخامت کل لایه می‌باشد فقط در صورتی که زهکشی دوطرفه باشد.
۴) درصورتی که زهکشی یکطرفه باشد، برابر ضخامت کل لایه و درصورتی که زهکشی دوطرفه باشد، برابر نصف ضخامت لایه است.

۱۲- در پروفیل شکل زیر چنانچه اضافه تنش وارد بر خاک (ناشی از بار گسترده) ۹ برابر تنش مؤثر در مرکز لایهٔ رسی باشد، در آن‌صورت با فرض $OCR = ۱$، نشست تحکیمی خاک رسی چند cm خواهد بود؟



۱) $۳۰\ cm$
۲) $۴۵\ cm$
۳) $۶۰\ cm$
۴) $۷۵\ cm$

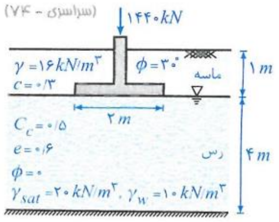
۱۳- قرار است خاکریزی به ارتفاع ۵ متر از مصالح با وزن مخصوص $۲/۶\ gr/cm^۳$ روی سطح زمین احداث شود. چاه‌های گمانه وضعیت سطح سفرهٔ آب زیرزمینی محل را مطابق شکل نشان می‌دهند. مقدار نشست ناشی از تحکیم لایه رسی چند سانتی‌متر است؟ ($\log ۲ = ۰/۳$، $\log ۳ = ۰/۵$، $OCR = ۱$)



۱) ۳۲
۲) ۶۴
۳) ۱۶
۴) ۲۸

۱۴- شالودهٔ مستطیلی با نسبت طول به عرض معادل ۴ و عرض برابر ۲ متر مطابق شکل برروی ماسه مستقر است. براساس اطلاعات داده شده و فرض توزیع تنش ۱ به ۲ و اینکه رس عادی‌تحکیم‌یافته است. نشست تحکیم لایه رسی کدام‌یک از گزینه‌های زیر می‌باشد؟ $(\log ۲ = ۰/۳)$

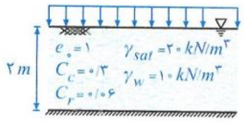
(سراسری - ۷۴)



۱) ۳۷/۵ سانتی‌متر
۲) ۷/۵ سانتی‌متر
۳) ۲۵ سانتی‌متر
۴) ۳۰ سانتی‌متر

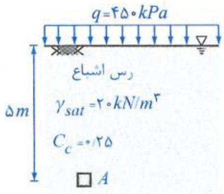
۱۵- مطابق شکل زیر خاک رس عادی‌تحکیم‌یافته تحت بارگذاری گسترده یکنواخت $۱۰\ kN/m^۲$ قرار گرفته است. با فرض اینکه افزایش تنش در اثر بارگذاری در کل ارتفاع خاک برابر $۱۰\ kN/m^۲$ باشد، نشست تحکیمی خاک چند سانتی‌متر خواهد بود؟ $(\log ۲ = ۰/۳)$

(سراسری - ۷۷)



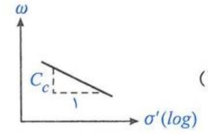
۱) ۳۰ ۲) ۱۸
۳) ۱۵ ۴) ۹

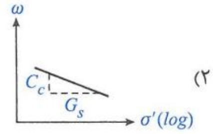
۱۶- المان A در عمق ۵ متری از سطح زمین در لایه‌ای از خاک رس اشباع قرار دارد. در این شرایط نسبت تخلخل (e) برای این المان ۱/۰ به‌دست آمده است. چنانچه در سطح زمین بار سرتاسری یکنواخت $q = ۴۵۰\,kPa$ اعمال شود، نسبت تخلخل در همین عمق در پایان تحکیم چقدر خواهد بود؟ ($\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$) (سراسری - ۹۳)

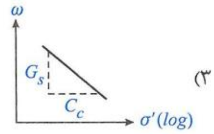


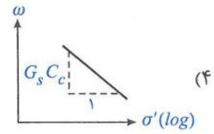
۱) ۰/۱
۲) ۱/۰
۳) ۰/۷۵
۴) ۱/۲۵

۱۷- در یک آزمایش تحکیم بر روی نمونهٔ رسی عادی تحکیم یافته، اگر نشانهٔ فشردگی و چگالی دانه‌های جامد خاک به‌ترتیب C_c و G_s باشند، نمودار تغییر درصد رطوبت در برابر $log\ \sigma'$ به کدام صورت است؟

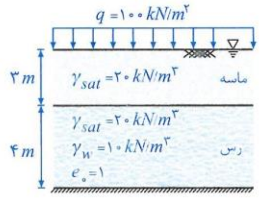
۱) 

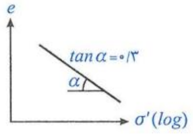
۲) 

۳) 

۴) 

۱۸- در شکل زیر، منحنی تحکیم خاک رس در کنار آن نشان داده شده است. درصد رطوبت خاک بعد از اتمام تحکیم چقدر می‌باشد؟ ($log\ ۳ = ۰/۵\ ,\ G_s = ۲/۵۵$)

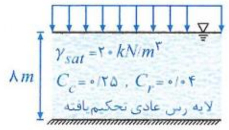




۱) ۸۵٪
۲) ۳۳٪
۳) ۶۶٪
۴) ۳۰٪

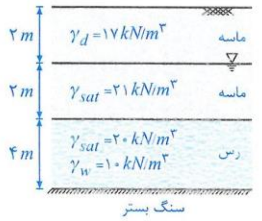
۱۹- یک لایه رسی به ضخامت ۸ متر روی لایه سنگی قرار گرفته و کاملاً اشباع است. اگر در مدت کوتاهی خاکریزی در سطح وسیع به ارتفاع ۲ متر و وزن مخصوص $\gamma = ۲۰\,kN/m^۳$ ساخته شود، نشست نهایی لایه رس چند سانتی‌متر است؟ رابطه بین درصد تخلخل e و تنش مؤثر به‌صورت: $e = ۰/۹ - ۰/۲۵\,log\,\frac{\sigma'}{۱۶}$ تعریف شده است و $\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$ می‌باشد. ($log\ ۲ = ۰/۳$) (سراسری-۸۲)

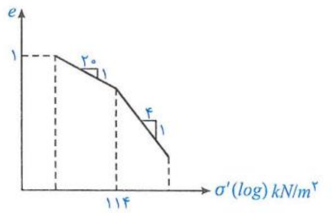
$$\Delta H = S_c = \frac{H_۰}{۱+e_۰}\left[C_r\,log\,\frac{\sigma'_c}{\sigma'_۰} + C_c\,log\,\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c}\right]$$



۱) ۱۲
۲) ۲۵
۳) ۳۳
۴) ۴۲

۲۰- نمودار نشان داده شده در شکل زیر از آزمایش تحکیم برروی یک نمونه خاک رسی به‌دست آمده است. پروفیل خاکی که از آن نمونه‌گیری انجام شده نیز در شکل مشخص است. اگر خاکریزی به وزن مخصوص $۱۹\,kN/m^۳$ و ارتفاع $۸\,m$ در سطح وسیعی برروی زمین در مدت ۲ سال ایجاد شود، میزان نشست تحکیمی لایهٔ رسی کدام است؟ ($log\ ۲ = ۰/۳, log\ ۳ = ۰/۵$)





۱) $۱۷\,cm$
۲) $۱۵\,cm$
۳) $۱۲\,cm$
۴) $۱۰\,cm$

۲۱- در آزمایش تحکیم یک بعدی، مدول سختی محصور شدهٔ خاک (D) از کدام رابطه قابل محاسبه است؟

۱) $\frac{۱+e_۰}{a_v}$
۲) $\frac{\Delta e}{a_v}$
۳) $\frac{\Delta e\,(۱+e_۰)}{a_v}$
۴) هیچکدام

۲۲- نمونه‌ای با حجم $100\,cm^3$ در آزمایش تحکیم، تحت افزایش تنش قائم $1\,kg/cm^2$ قرار می‌گیرد. وقتی افزایش فشار آب منفذی در نمونه $0/2\,kg/cm^2$ است، حجم این نمونه $84\,cm^3$ شده است. مقدار ضریب تغییر حجم (m_v) چقدر است؟ (برحسب cm^2/kg)

۱) ۰/۲ ۲) ۰/۱۶ ۳) ۰/۴ ۴) ۰/۳۲

۲۳- در یک آزمایش تحکیم یک‌بعدی، رطوبت اولیه نمونهٔ رسی در تنش قائم $75\,kPa$، برابر ٪۴۰ و نسبت تخلخل آن $e_0 = 1$ است. افزایش تنش قائم تا $200\,kPa$ باعث کاهش درصد رطوبت تا ٪۳۰ می‌گردد. ضریب تغییرحجم برحسب m^2/kN چقدر است؟ ($G_S = 2/5$)

۱) 10^{-3} ۲) 5×10^{-4} ۳) 2×10^{-3} ۴) $0/5\times10^{-3}$

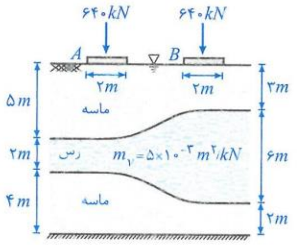
۲۴- یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۱۰ متر دارای تخلخل اولیهٔ $e_0 = 0/6$ می‌باشد. در اثر اعمال یک بار گستردهٔ یکنواخت بر روی این خاک ۱/۰ متر نشست تحکیم رخ داده است. اگر $m_v = 0/004\,\frac{1}{kPa}$ باشد، درجهٔ تخلخل خاک در پایان تحکیم و بارگستردهٔ وارد بر این لایهٔ رسی حدوداً چند kPa بوده است؟ (سراسری - ۹۰)

۱) ۰/۳۸ و ۳۰ ۲) ۰/۳۸ و ۴۰ ۳) ۰/۴۴ و ۲۵ ۴) ۰/۵۳ و ۳۰

۲۵- در یک آزمایش تحکیم بر روی یک نمونه خاک رس با تخلخل اولیه $e_0 = 0/5$، اگر تنش مؤثر وارده از $10\,kPa$ به $45\,kPa$ افزایش یابد، میزان تخلخل خاک به اندازه ۰/۱۷۵ تغییر می‌کند. میزان ضریب تراکم‌پذیری a_v و ضریب تغییر حجم m_v و مدول سختی محصور شده D (برحسب kPa) برای این خاک به‌ترتیب از راست به چپ تقریباً کدام است؟ (سراسری - ۹۳)

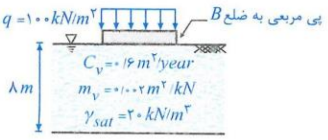
۱) ۰/۰۱۴، ۰/۰۱۲، ۸۲ ۲) ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۲، ۱۶۴ ۳) ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۳، ۳۰۰ ۴) ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۳۳، ۳۰۰

۲۶- در شکل زیر نشست نامتقارن در زیر دو پی مربعی که بار ستون‌های مشابهی را به زمین منتقل می‌کنند، چقدر است؟ (برای محاسبه اضافه تنش از روش تقریبی ۲ به ۱ استفاده کنید.)



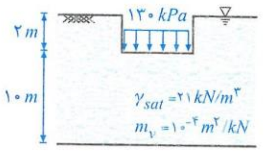
۱) $10\,cm$
۲) $20\,cm$
۳) $30\,cm$
۴) $40\,cm$

۲۷- یک پی مربعی شکل به ضلع B، مطابق شکل برروی یک لایه رسی اشباع به ضخامت ۸ متر قرار گرفته است. اگر نشست آنی و نشست مجاز پی به‌ترتیب $5\,cm$ و $45\,cm$ باشند، در آن‌صورت حداکثر ضلع پی برحسب متر (براساس ملاحظات نشست) چقدر است؟ برای محاسبه نشست، اضافه تنش قائم را در وسط لایه رسی و با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱ محاسبه نمایید.



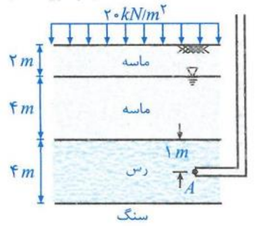
۱) ۲/۵ متر
۲) ۱/۵ متر
۳) ۳ متر
۴) ۴ متر

۲۸- در پروفیل زیر ابتدا ۲ متر خاکبرداری انجام شده و سپس مطابق شکل، بار $130\,kPa$ برروی پی دایره‌ای به شعاع ۵ متر اعمال می‌شود. میزان نشست تحکیمی لایهٔ رس اشباع چند سانتی‌متر است؟ (برای محاسبه اضافه تنش از روش تقریبی ۲ به ۱ استفاده کنید و اضافه تنش در عمق ۵ متری زیر پی را به‌عنوان اضافه تنش متوسط لایه درنظر بگیرید.)



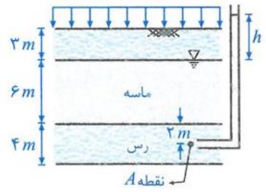
۱) $3/9\,cm$
۲) $4/8\,cm$
۳) $5/8\,cm$
۴) $6/67\,cm$

۲۹- نیمرخ خاک منطقه‌ای مطابق شکل است. یک خاکریز که فشار یکنواخت $۲۰ \, kN/m^۲$ را بر سطح ماسه وارد می‌کند، به سرعت و در سطح وسیع اجرا می‌شود. در طول مدت‌زمان معلومی ارتفاع آب در پیزومتر نشان داده شده ۰/۵ متر افت داشته است. در این مدت برای خاک رس در محل A می‌توان گفت: درجه تحکیم ...... درصد افزایش و تنش مؤثر (kPa) ...... افزایش داشته است. (سراسری - ۸۰)



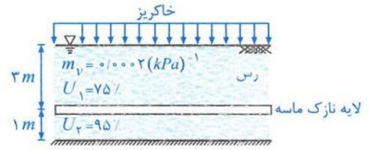
۱) ۲۵ و ۵
۲) ۲۵ و ۲۵
۳) ۵۰ و ۵۰
۴) ۵۰ و ۲۵

۳۰- مطابق شکل زیر پروفیل خاک را درنظر بگیرید. در سطح زمین شدت بار گسترده یکنواخت $\Delta P = ۲۵۰۰ \, kg/m^۲$ وارد شده است. چنانچه درجه تحکیم در نقطه A برابر ٪۶۰ باشد، ارتفاع آب در پیزومتر نسبت به تراز سطح آب زیرزمینی کدام است؟ (سراسری-۷۷)



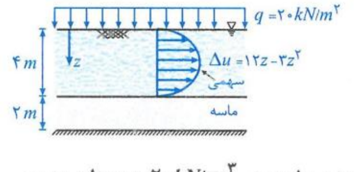
۱) ۶ m
۲) ۵/۴ m
۳) ۱/۲ m
۴) ۱ m

۳۱- شکل زیر یک لایه رسی را نشان می‌دهد که در آن یک لایه نازک ماسه با زهکشی آزاد در فاصله ۱ متری از سطح تحتانی رس تعبیه شده است. یک لایه خاکریز به ضخامت ۳ متر و وزن مخصوص $۲۰ \, kN/m^۳$ برروی لایه مذکور ساخته می‌شود. اگر سه سال بعد از اتمام خاکریزی، درجه تحکیم متوسط در دو لایه جدا شده توسط زهکش برابر ٪۷۵ و ٪۹۵ باشد، نشست سطح خاک، سه سال بعد از عملیات خاکریزی چقدر خواهد بود؟



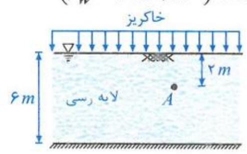
۱) ۴۸mm
۲) ۴۳/۲mm
۳) ۳۶mm
۴) ۳۸/۴mm

۳۲- یک لایه رس اشباع به ضخامت ۴ متر که مطابق شکل از دو سمت بالا و پایین زهکشی می‌شود، تحت بارگذاری یکنواخت $۲۰ \, kN/m^۲$، در سطح وسیعی قرار می‌گیرد. اگر در یک لحظه مشخص منحنی توزیع اضافه فشار آب حفره‌ای در لایه، یک سهمی مطابق شکل زیر باشد، در آن‌صورت درجه تحکیم در وسط لایه رس چند برابر درجه تحکیم متوسط در لایه است؟



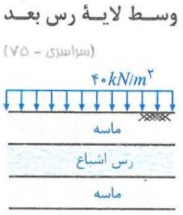
۱) $\frac{۳}{۴}$
۲) $\frac{۴}{۵}$
۳) $\frac{۲}{۳}$
۴) $\frac{۱}{۳}$

۳۳- مطابق شکل زیر برروی یک لایه رسی به ضخامت ۶ متر، یک خاکریز ماسه‌ای به ارتفاع ۵ متر و وزن مخصوص $۲۰ \, kN/m^۳$ در سطح وسیعی اجرا می‌شود. در صورتی که درجه تحکیم در نقطه A برابر ٪۴۰ باشد، فشار آب حفره‌ای در این نقطه چقدر است؟ $(\gamma_w = ۱۰ \, kN/m^۳)$



۱) $۶۰ \, kN/m^۲$
۲) بیشتر از $۶۰ \, kN/m^۲$
۳) $۸۰ \, kN/m^۲$
۴) بیشتر از $۸۰ \, kN/m^۲$

۳۴- بار گسترده یکنواختی برابر $۴۰ \, kN/m^۲$ به‌طور آنی بر سطح زمین وارد شده است. پس از دو سال نشست ناشی از تحکیم لایه رس برابر $۲ \, cm$ می‌باشد. اگر نشست نهایی لایهٔ رس در خاتمه عمل تحکیم برابر $۴ \, cm$ باشد، فشار آب حفره‌ای اضافی در وسط لایهٔ رس بعد از ۲ سال چقدر است؟ (t_f = زمان لازم برای انجام ٪۱۰۰ تحکیم) (سراسری - ۷۵)



۱) کمتر از $۲۰ \, kN/m^۲$
۲) برابر $۲۰ \, kN/m^۲$
۳) بیشتر از $۲۰ \, kN/m^۲$
۴) برابر با $۴۰ \times \frac{۲ \text{ سال}}{t_f}$

۳۵- در آزمایش تحکیم (ادئومتر)، نمونه رس اشباع در شروع آزمایش ($t_{\circ}$) تحت فشار آنی $۲kg / cm^{۲}$ قرار می‌گیرد. اگر نشست نهایی این نمونه (تحت فشار $۲kg / cm^{۲}$) ۵ میلی‌متر باشد، کدام عبارت درمورد این نمونه در لحظه $t_{۵۰}$ (٪۵۰ تحکیم متوسط) صحیح است؟

(سراسری - ۷۷)

۱) تنش مؤثر قائم در سطح بالایی و پایینی نمونه برابر $۲kg / cm^{۲}$ و در وسط نمونه برابر $۱kg / cm^{۲}$ است.

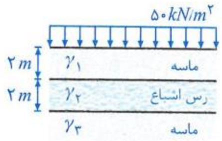
۲) فشار آب حفره‌ای اضافی در وسط نمونه رس بیشتر از $۱kg / cm^{۲}$ و نشست تحکیمی برابر $۲/۵ \ mm$ است.

۳) فشار آب حفره‌ای اضافی در وسط نمونه رس برابر $۱kg / cm^{۲}$ و نشست تحکیمی برابر $۲/۵ \ mm$ است.

۴) نشست تحکیمی برابر ۲/۵ میلی‌متر و نشانه خلاء خاک در وسط نمونه به میزان ٪۵۰ کاهش یافته است.

۳۶- بار گسترده یکنواختی به شدت $۵۰ \ kN/m^{۲}$ بطور آنی بر سطح زمین وارد شده است. پس از ۶ ماه فشار آب حفره‌ای اضافه در وسط لایه رس $۲۵ \ kN/m^{۲}$ اندازه‌گیری شده است. اگر نشست نهایی لایه رس در خاتمه عمل تحکیم ۷ cm باشد، نشست تحکیمی لایه رس پس از ۶ ماه چقدر است؟

(سراسری - ۸۲)



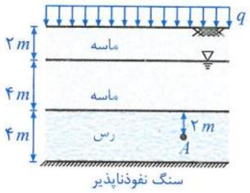
۱) بیشتر از ۳/۵ cm

۲) برابر با ۳/۵ cm

۳) کمتر از ۳/۵ cm

۴) برابر با $\frac{۶ماه}{t_f}$ (t_f= زمان لازم برای تحکیم کامل)

۳۷- پروفیل خاک منطقه‌ای مطابق شکل است. یک خاکریز که فشار یکنواخت q را بر سطح ماسه‌ای وارد می‌کند، به‌سرعت و در سطح وسیعی اجرا می‌شود. پس از گذشت زمان معلومی ارتفاع آب در پیزومتر واقع در نقطهٔ A، $۱m$ افت می‌کند. اگر تحکیم نهایی لایه رس $۷cm$ بوده و در مدت‌زمان موردنظر مقدار نشست لایه $۳/۵cm$ باشد، مقدار q چقدر است؟ ($\gamma_w = ۱۰ \ kN/m^{۳}$)



۱) کمتر از $۲۰ \ kN/m^{۲}$

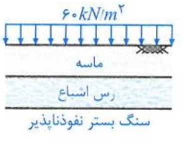
۲) بیشتر از $۱۰ \ kN/m^{۲}$

۳) کمتر از $۱۰ \ kN/m^{۲}$

۴) بیشتر از $۲۰ \ kN/m^{۲}$

۳۸- بار گسترده یکنواختی برابر $۶۰ \ kN/m^{۲}$ به طور آنی بر سطح زمین وارد شده است. پس از ۳ سال نشست ناشی از تحکیم لایه رس برابر ۳ cm می‌باشد. اگر نشست نهایی لایه رس در خاتمه تحکیم ۶cm باشد، پس از سه سال از اعمال بار در مورد این لایه رس می‌توان گفت: فشار آب حفره‌ای اضافی در ... .

(سراسری - ۷۹)



۱) تمام عمق لایه رس برابر $۳۰ \ kN/m^{۲}$ می‌باشد.

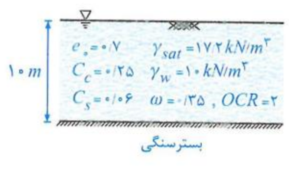
۲) سطح بالایی و پایینی لایه رس کاملاً محو شده است.

۳) سطح بالایی برابر صفر و در وسط لایه برابر $۳۰ \ kN/m^{۲}$ می‌باشد.

۴) سطح فوقانی برابر با صفر و در وسط لایه رس بیش از $۳۰ \ kN/m^{۲}$ می‌باشد.

۳۹- خاکریزی به ارتفاع ۴ متر در سطح وسیع برروی یک لایه رس اشباع طی مدت ۶ ماه انجام می‌شود. وزن مخصوص مصالح خاکریز $۱۸ \ kN/m^{۳}$ می‌باشد. در صورتی که تحکیم متوسط بعد از ۳ سال بارگذاری ٪۳۰ باشد، میزان نشست خاک پس از گذشت ۳ سال از بارگذاری چقدر خواهد شد؟ ($log \ ۲ = ۰/۳$, $log \ ۳ = ۰/۵$)

(سراسری - ۸۴)



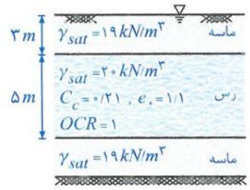
۱) ۶ سانتی‌متر

۲) ۱۲ سانتی‌متر

۳) ۱۸ سانتی‌متر

۴) ۲۴ سانتی‌متر

۴۰- لایه‌ای از رس بطور عادی‌تحکیم‌یافته به ضخامت ۵ متر از بالا و پایین توسط دو لایه ماسه اشباع نفوذپذیر محصور شده است. در اثر بارگذاری روی سطح زمین تنش کل قائم در وسط لایه رس به میزان $۲۶\ kN/m^۲$ افزایش می‌یابد. شش ماه پس از بارگذاری نشست تحکیمی لایه رس ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. فشار آب حفره‌ای اضافی در وسط لایه رسی، شش ماه پس از بارگذاری چقدر است؟ $(\log ۱/۵ = ۰/۲, \gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳)$ (سراسری - ۸۴)



۱) برابر با $۱۳\ kN/m^۲$
۲) کمتر از $۱۰\ kN/m^۲$
۳) برابر با $۱۰\ kN/m^۲$
۴) بیشتر از $۱۳\ kN/m^۲$

۴۱- در یک نمونه خاک رسی مقادیر ضریب نفوذپذیری و ضریب تحکیم به‌ترتیب برابر $۶/۶۷ \times ۱۰^{-۶}\ cm/s$ و $۱/۱ \times ۱۰^{-۲}\ cm^۲/s$ می‌باشد. اگر وزن مخصوص آب $۱۰\ kN/m^۳$ باشد، ضریب تغییرحجم خاک کدام است؟

۱) $۶۰ cm^۲/kN$ ۲) $۶ cm^۲/kN$ ۳) $۱۰ cm^۲/kN$ ۴) $۱ cm^۲/kN$

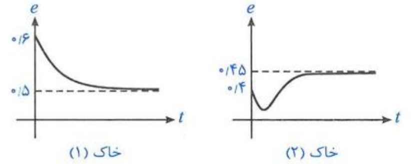
۴۲- در یک آزمایش تحکیم بر روی نمونه رسی با نسبت تخلخل اولیه $e_۰ = ۰/۸$، ضریب تحکیم خاک $C_v = ۰/۱۸ mm^۲/sec$ به‌دست آمده است. در این خصوص اطلاعات زیر در دست است: (سراسری - ۸۶)

بار اولیه: $۱۶۰ kPa \Rightarrow e_۰ = ۰/۸$ بار ثانویه: $۳۶۰ kPa \Rightarrow e_۱ = ۰/۷$

ضریب نفوذپذیری خاک را برآورد نمائید. $(\gamma_w = ۱۰\ kN/m^۳)$

۱) $۰/۵ \times ۱۰^{-۹}\ m/sec$ ۲) $۰/۵ \times ۱۰^{-۹}\ cm/sec$ ۳) $۶/۵ \times ۱۰^{-۳}\ m/sec$ ۴) $۶/۵ \times ۱۰^{-۳}\ cm/sec$

۴۳- نمودار تغییرات نشانه خلاء دو خاک (۱) و (۲) در اثر بارگذاری مشخص $\Delta\sigma$، به‌صورت زیر رسم شده است. در صورتی که $C_{v_۱} = \frac{۱}{۲} C_{v_۲}$ باشد، نسبت نفوذپذیری خاک (۱) به خاک (۲) چقدر است؟

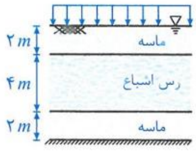


۱) ۰/۷۷۵
۲) ۰/۸۷۵
۳) ۰/۶
۴) ۰/۹۷۵

۴۴- اگر یک نمونه رسی دارای ضخامت $۲cm$ باشد و در آزمایش تحکیم، ظرف مدت ۵۰ دقیقه ۵۰٪ نشست تحکیمی خود را انجام دهد، در این صورت ضریب نفوذپذیری خاک مورد آزمایش چند سانتی‌متر بر دقیقه است؟ $(\pi = ۳, m_v = ۰/۰۰۲۴\ cm^۲/gr)$

۱) ۹×۱۰^{-۳} ۲) ۹×۱۰^{-۵} ۳) ۹×۱۰^{-۴} ۴) ۹×۱۰^{-۶}

۴۵- مطابق شکل زیر بار گستردهٔ q در یک سطح وسیع به سرعت روی خاک اعمال می‌شود. اگر یک لایه ماسه‌ای نازک در وسط خاک رسی قرار گیرد، در آن‌صورت میزان نشست تحکیمی (نهایی) و سرعت تحکیم در خاک رس چه تغییری می‌کنند؟



۱) نشست نهایی تغییر نمی‌کند ولی سرعت تحکیم دوبرابر می‌شود.
۲) نشست نهایی دوبرابر و سرعت تحکیم ۴ برابر می‌شود.
۳) نشست نهایی تغییر نمی‌کند ولی سرعت تحکیم ۴ برابر می‌شود.
۴) نشست نهایی و سرعت تحکیم هر دو ۴ برابر می‌شود.

۴۶- سه ماه پس از احداث سریع سازه برروی یک خاک رسی، درصد اضافه فشار آب حفره‌ای باقیمانده در این لایه ۸۰٪ می‌باشد. نتایج آزمایش تحکیم برروی خاک نشان می‌دهد که نشست نهایی لایهٔ رسی ۱ متر است. تعیین کنید ظرف مدت یک‌سال لایهٔ رسی چند سانتی‌متر نشست خواهد داشت؟

۱) ۲۵ ۲) ۴۰ ۳) ۵۰ ۴) ۶۰

۴۷- در یک آزمایش تحکیم روی نمونه رسی به ضخامت ۴ سانتی‌متر در مدت زمان ۵ دقیقه ٪۷۰ نشست نهایی ثبت شده است. اگر لایه‌ای از این خاک به ضخامت ۲ متر روی لایه‌ای سنگی قرار داشته باشد، طی حدود چند روز همان درصد نشست فوق را متحمل خواهد شد؟ (سراسری - ۹۳)

۱) ۴ ۲) ۸ ۳) ۱۷ ۴) ۳۵

۴۸- فرض می‌کنیم یک نمونه خاک رس با زهکشی یک‌طرفه و ضخامت معلوم h_1 در زمان مشخص t_1 به درصد تحکیم معین U_1 برسد. اگر ضخامت نمونه دوبرابر و زهکشی دوطرفه گردد، نسبت t_2 جدید به زمان حالت قبلی $\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$ به شرطی که همان درجه تحکیم سابق (U_1) عاید گردد، برابر است با: (سراسری - ۸۲)

۱) ۱ ۲) ۲
۳) ۴ ۴) قابل محاسبه نیست زیرا به درجه تحکیم بستگی دارد.

۴۹- لایه‌ای از خاک رس اشباع به ضخامت ۴ متر در مدت ۱۰ سال ۴۵ درصد نشست تحکیم را انجام داده است. چنانچه لایه دیگری از همین خاک به ضخامت ۸ متر با شرایط زهکشی یکسان بخواهد درصد نشست تحکیم برابری را داشته باشد، چند سال بطول می‌انجامد؟ (سراسری - ۸۳)

۱) ۱۰۰ سال ۲) ۸۰ سال ۳) ۴۰ سال ۴) ۲۰ سال

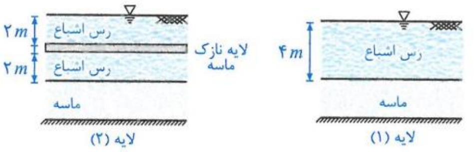
۵۰- یک لایه رس اشباع با زهکشی دوطرفه و ضخامت H پس از t سال به درجه تحکیم متوسط U رسیده است. چنانچه در ترازهای افقی $\frac{1}{3}$ و $\frac{2}{3}$ ضخامت لایه از ماسه با ضخامت قابل اغماض به نحوی که قادر به زهکشی باشند استفاده کنیم، همان درجه تحکیم در چه زمانی نسبت به زمان اولیه به‌دست می‌آید؟ (سراسری - ۸۵)

۱) $\frac{1}{9}$ ۲) $\frac{1}{3}$ ۳) ۳ ۴) ۹

۵۱- یک لایه رس اشباع با زهکشی یک‌طرفه و ضخامت ۶ متر، پس از یک سال ۲۵ درصد از تحکیم خود را انجام می‌دهد. چنانچه در وسط این لایه از ماسه با ضخامت ناچیز جهت زهکشی استفاده شود، در آن‌صورت مدت‌زمان لازم برای اینکه رس موجود در قسمت بالا به ۵۰ درصد تحکیم خود برسد، چقدر است؟

۱) ۱ سال ۲) ۰/۵ سال ۳) ۰/۷۵ سال ۴) ۰/۲۵ سال

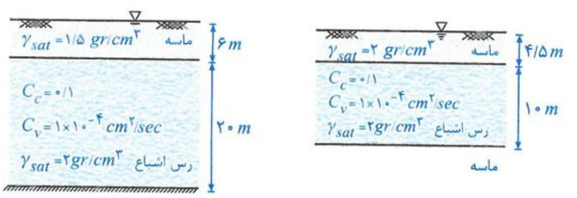
۵۲- دو لایه خاک رس اشباع مطابق شکل زیر مفروض است. ضریب قابلیت فشردگی حجمی (m_v) برای هردولایه یکسان بوده و نفوذپذیری خاک رس در لایه اول ۱۶ برابر نفوذپذیری خاک رس در لایهٔ دوم است. اگر بعد از گذشت زمان t خاک لایهٔ اول به درجه تحکیم ۰/۴ برسد، درصد تحکیم خاک لایهٔ دوم بعد از گذشت زمان $4t$ چقدر خواهد بود؟ $\left(T_v = \frac{\pi}{4} U^2\right)$



لایه (۲) لایه (۱)

۱) ٪۲۰
۲) ٪۴۰
۳) ٪۶۰
۴) ٪۸۰

۵۳- دو پروفیل از یک نوع خاک رس اشباع مطابق شکل مدنظر است. اگر مدت زمان لازم برای رسیدن پروفیل یک به ۴۰ درصد تحکیم برابر یک سال باشد، مدت زمان لازم برای رسیدن پروفیل دو به ۲۰ درصد تحکیم چه میزان است؟ $\left(T_v = \frac{\pi}{4} U_t^2\right)$ (سراسری - ۸۶)

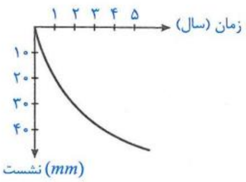


(پروفیل دو) (پروفیل یک)

۱) $\frac{1}{4}$ سال
۲) ۱ سال
۳) ۲ سال
۴) ۴ سال

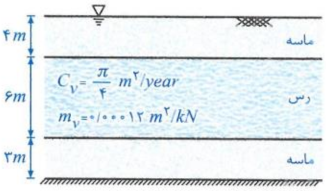
مباحث تکمیلی نشست خاک

۵۴- بارگذاری تدریجی جهت تحکیم خاک رسی در طول ۲ سال انجام شده است. اگر منحنی نشست تحکیمی ناشی از اعمال آنی بار مطابق شکل زیر باشد، ۳ سال پس از شروع بارگذاری میزان نشست واقعی (اصلاح شده) خاک چه میزان است؟ (سراسری - ۸۳)



۱) $20 mm$
۲) $30 mm$
۳) $40 mm$
۴) با اطلاعات موجود قابل محاسبه نیست.

۵۵- برروی نیمرخ خاکی به شرح شکل زیر، یک خاکریز در طول یک سال به ارتفاع ۵ متر و وزن مخصوص $20\, kN/m^3$ ساخته می‌شود، نشست تحکیمی لایه رس پس از گذشت ۶ ماه از اتمام عملیات خاکریزی چقدر است؟



۱) $72\ mm$
۲) $36\ mm$
۳) $31\ mm$
۴) $24\ mm$

۵۶- یک بار گسترده به شدت $20\, kPa$، ظرف مدت یک سال بر یک لایه خاک رس اشباع به ضخامت ۵ متر وارد می‌شود. یک سال پس از اتمام بارگذاری، لایه رسی ۶۰ درصد نشست تحکیمی خود را انجام داده است. میزان نشست در این لحظه (۶۰ درصد تحکیم) چقدر است؟ $(m_v = 0.003\, m^2/kN\ , C_v = 0.002\, m^2/day)$

۱) $15\, cm$
۲) $18\, cm$
۳) $23\, cm$
۴) اطلاعات داده شده کافی نمی‌باشند.

۵۷- تحکیم ثانویه در کدامیک از خاک‌های زیر اهمیت بیشتری دارد؟

۱) MH
۲) ML
۳) CH
۴) CL

۵۸- یک پی مستطیلی با نسبت طول به عرض ۲، تحت بار قائم P در مرکز خود، سبب ایجاد نشست الاستیک S_e در یک لایه خاک ماسه‌ای شده است. چنانچه عرض این پی ۴ برابر شود و طول آن تغییر نکند و بار وارده $\frac{1}{4}$ حالت اول گردد، میزان نشست الاستیک در این حالت کدام‌یک از گزینه‌های زیر خواهد شد؟ (بار P نیروی وارد بر پی است.)

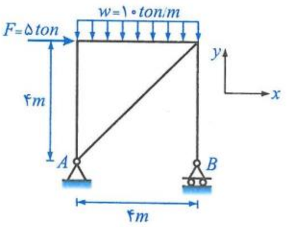
۱) $2S_e$
۲) S_e
۳) $\frac{1}{4} S_e$
۴) $\frac{1}{8} S_e$

۵۹- در یک خاک ماسه‌ای برای پی تکی بدون عمق مدفون و عرض $B_1 = 1m$، تنش مجاز براساس نشست مجاز ۱ اینچ برابر $70\, kPa$ به‌دست آمده است. برای یک پی بدون عمق مدفون، عرض $B_2 = 2\,m$ و نشست مجاز ۱/۵ اینچ واقع بر همان خاک، حداکثر بار مجاز چند kN است؟ (سراسری - ۹۳)

۱) ۱۴۰
۲) ۲۸۰
۳) ۲۱۰
۴) ۴۲۰

۶۰- برای قاب بادبندی شدهٔ شکل زیر با اتصالات مفصلی، قرار است دو پی مجزای مربعی در زیر تکیه‌گاه‌های A و B طراحی شود. اگر پی‌ها بدون عمق مدفون باشند، نسبت نشست الاستیک پی B (با بُعد ۲ متر) به پی A (با بُعد ۱/۵ متر)، برابر کدام است؟ (سراسری - ۹۲)

توجه: خاک زیر پی دارای مدول الاستیسیتهٔ E و ضریب پواسون ν می‌باشد.



۱) ۰/۷۵
۲) ۰/۸
۳) ۱/۳۳
۴) ۱/۲۵

پاسخ تست‌های فصل هفتم

۱- (۱)

همانطورکه در متن درس گفته شد، یکی از عوامل افزایش تنش مؤثر و در نتیجه نشست تحکیم در خاک رس اشباع، پایین آمدن تراز آب زیرزمینی می‌باشد.

۲- (۴)

طبق مطالب گفته شده در مورد انواع نشست در خاک‌های مختلف، در خاک رس نزدیک به اشباع، شاهد وقوع نشست آنی و تحکیم می‌باشیم. این در حالی است که اگر خاک رس اشباع باشد، از نشست آنی آن در مقابل نشست تحکیم صرف‌نظر کرده و تنها نشست تحکیم را در نظر می‌گیریم.

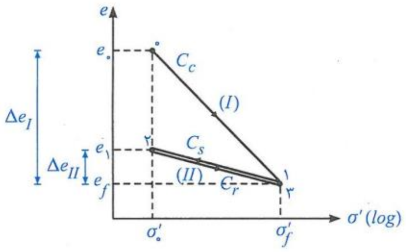
۳- (۲)

در اثر بارندگی زیاد، سطح آب زیرزمینی بالا آمده و ماسه خشک را نیز اشباع می‌کند. در این شرایط (هنگام بارندگی) تنش مؤثر جدید از تنش مؤثر تجربه شده در پروفیل عادی خاک (وضعیت موجود)، کمتر خواهد بود و به همین علت اولاً خاک رس در وضعیت موجود عادی تحکیم یافته است، ثانیاً به هنگام بارندگی خاک رس پیش‌تحکیم یافته به حساب می‌آید. پس می‌توان گفت گزینه‌های (۱) و (۳) نادرست بوده و گزینهٔ (۲) درست است. در ضمن وقوع بارندگی باعث کاهش تنش مؤثر و تورم در خاک رس می‌شود و از این‌رو گزینهٔ (۴)، عبارت نادرستی است.

۴- (۱)

در حالت اول خاک رس عادی تحکیم یافته بوده و تغییرشکل آن زیاد است، این در حالی است که پس از برداشته شدن خاکریز، خاک رس پیش‌تحکیم یافته می‌شود. حال اگر همان میزان بار (به اندازهٔ بار خاکریز) را دوباره بر روی آن وارد کنیم، دیگر نشست خاک $۱۰cm$ نشده و کمتر از این مقدار خواهد بود.

برای درک بهتر این موضوع می‌توان از منحنی تحکیم نیز کمک گرفت:



- در حالت اول که خاک رس عادی تحکیم یافته است، در هنگام بارگذاری، با شیب C_c از نقطهٔ (۰) به نقطهٔ (۱) حرکت می‌کنیم، ولی در طول باربرداری ضمن حرکت از نقطهٔ (۱) به (۲)، شیب منحنی برابر C_s است.
- در حالت دوم خاک رس پیش تحکیم یافته شده است و در هنگام بارگذاری مجدد بر روی آن، در حرکت از نقطهٔ (۲) به (۳) مجدداً شیب منحنی کم و برابر $C_r = C_s$ خواهد بود.

ملاحظه می‌کنید که به‌ازاء بارگذاری یکسان q در حالت‌های اول و دوم، Δeهای متفاوت به‌دست می‌آید، به‌طوری‌که $\Delta e_{II} < \Delta e_I$ شده و در نتیجه $\Delta H_{II} < \Delta H_I = ۱۰cm$ خواهد بود.

۵- (۲)

ابتدا با استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل، Δe را می‌یابیم:

$$\frac{\Delta H}{H_۰} = \frac{\Delta e}{۱+e_۰} \Rightarrow \frac{۳-۲/۷}{۳} = \frac{\Delta e}{۱+۰/۷۵} \Rightarrow \Delta e = ۰/۱۷۵$$

حال می‌توان e_f (نشانهٔ خلاء در پایان تحکیم) را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\Delta e = e_۰ - e_f \Rightarrow ۰/۱۷۵ = ۰/۷۵ - e_f \Rightarrow e_f = ۰/۷۵ - ۰/۱۷۵ \simeq ۰/۵۸$$

۶- (۳)

طبق رابطهٔ کلی تغییرشکل، داریم:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ}$$

حال برای محاسبهٔ ΔH (نشست) لازم است تا ابتدا $e_\circ$ و سپس Δe را به‌دست آوریم:

$$\begin{cases} eS_r=\omega G_s \xrightarrow{S_r=1} e_\circ\times 1=0/4\times 2/5=1 \Rightarrow e_\circ=1 \\ \text{طبق صورت سؤال}: e_f=0/95e_\circ=0/95\times 1=0/95 \end{cases} \Rightarrow \Delta e=e_\circ-e_f=1-0/95=0/05$$

و در نهایت با جایگذاری $e_\circ$ و Δe در رابطهٔ اولیه، ΔH به‌دست می‌آید:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ} \Rightarrow \frac{\Delta H}{\underbrace{200}_{H_\circ=2m=200cm}}=\frac{0/05}{1+1} \Rightarrow \Delta H=5\,cm$$

۷- (۲)

تغییر ضخامت نسبی نمونه همان $\varepsilon=\frac{\Delta H}{H_\circ}$ می‌باشد، بنابراین برای به‌دست آوردن $e_\circ$ از رابطهٔ کلی تغییرشکل استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ} \Rightarrow \frac{e_\circ-e_f}{1+e_\circ}=0/05$$

از طرفی مقدار e_f با استفاده از رابطهٔ وزنی و حجمی معروف زیر، به‌سادگی قابل تعیین است:

$$eS_r=\omega G_s \xrightarrow{S_r=1} e_f\times 1=0/1\times 2/5 \Rightarrow e_f=0/25$$

و در نهایت با جایگذاری e_f در رابطهٔ اولیه، $e_\circ$ را به‌دست می‌آوریم:

$$\frac{e_\circ-0/25}{1+e_\circ}=0/05 \Rightarrow e_\circ-0/25=0/05+0/05e_\circ \Rightarrow 0/95e_\circ=0/3 \Rightarrow e_\circ=\frac{0/3}{0/95}\simeq 0/32$$

۸- (۱)

برای محاسبهٔ وزن مخصوص اشباع خاک پس از پایان تحکیم، لازم است تا e_f را به‌دست آوریم، زیرا:

$$\text{در انتهای تحکیم}: \gamma_{sat}=\left(\frac{G_s+e_f}{1+e_f}\right)\gamma_w$$

اما برای محاسبهٔ e_f، از رابطهٔ کلی تغییرشکل استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ} \Rightarrow \frac{50}{\underbrace{500}_{H_\circ=5\,m=500\,cm}}=\frac{\Delta e}{1+0/5} \Rightarrow \Delta e=0/15 \Rightarrow e_\circ-e_f=0/15 \Rightarrow 0/5-e_f=0/15 \Rightarrow e_f=0/35$$

و در نهایت وزن مخصوص اشباع خاک پس از خاتمهٔ تحکیم برابر می‌شود با:

$$\text{در انتهای تحکیم}: \gamma_{sat}=\left(\frac{G_s+e_f}{1+e_f}\right)\gamma_w=\frac{2/5+0/35}{1+0/35}\times 10=21/1\,kN/m^3$$

۹- (۱)

ابتدا با استفاده از روابط وزنی و حجمی فصل اول، نسبت تخلخل و پوکی اولیه خاک را قبل از تحکیم می‌یابیم:

$$\begin{cases} n_\circ=\frac{e_\circ}{1+e_\circ} \\ \gamma_{sat}=\left(\frac{G_s+e_\circ}{1+e_\circ}\right)\gamma_w \Rightarrow 18=\frac{2/6+e_\circ}{1+e_\circ}\times 10 \Rightarrow 1/8+1/8e_\circ=2/6+e_\circ \Rightarrow e_\circ=1 \end{cases} \Rightarrow n_\circ=\frac{1}{1+1}=0/5$$

حال با استفاده از رابطهٔ کلی تغییرشکل، e_f و از آنجا n_f را محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ} \Rightarrow \frac{30}{\underbrace{600}_{H_\circ=6\,m=600\,cm}}=\frac{\Delta e}{1+1} \Rightarrow \Delta e=0/1 \Rightarrow e_\circ-e_f=0/1 \Rightarrow 1-e_f=0/1 \Rightarrow e_f=0/9$$

$$n_f=\frac{e_f}{1+e_f}=\frac{0/9}{1+0/9}\simeq 0/47$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید در اثر تحکیم، پوکی ۰/۰۳ $(0/5-0/47=0/03)$ کاهش یافته است.

۱۰- (۳)

ابتدا وزن مخصوص اشباع اولیهٔ خاک را می‌یابیم:

$$\gamma_{sat_1} = (\frac{G_s + e_0}{1+e_0})\gamma_w = \frac{2/65 + 0/65}{1+0/65}\times 1 = 2 t/m^3$$

سپس طبق اطلاعات داده شده در صورت سؤال، وزن مخصوص اشباع خاک در پایان تحکیم را تعیین می‌کنیم:

$$\gamma_{sat_2} = 1/05\,\gamma_{sat_1} = 1/05\times 2 = 2/1$$

در ادامه نیز نسبت تخلخل خاک در پایان تحکیم را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\gamma_{sat_2} = \frac{G_s + e_f}{1+e_f}\gamma_w \Rightarrow 2/1 = \frac{2/65 + e_f}{1+e_f}\times 1 \Rightarrow 2/1 + 2/1 e_f = 2/65 + e_f \Rightarrow e_f = 0/5$$

حال با استفاده از رابطهٔ کلی تغییرشکل، خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \Rightarrow \frac{\Delta H}{3/3} = \frac{0/65 - 0/5}{1+0/65} = \frac{0/15}{1/65} \Rightarrow \Delta H = 0/3\,m = 30\,cm$$

۱۱- (۱)

فرمول داده شده در این تست از رابطهٔ کلی تغییرشکل در خاک رس نتیجه می‌شود که به‌صورت زیر است:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} \xrightarrow{H_0 = H} \Delta H = \frac{H}{1+e_0}\boxed{\Delta e}$$

$$\Delta e = C_c \log(\frac{P' + \Delta P}{P'})$$

در رابطهٔ فوق $\frac{\Delta H}{H}$ تغییر طول نسبی خاک است و به همین علت H همواره ضخامت کل لایهٔ خاک رسی بوده و هیچ ارتباطی به الگوی زهکشی خاک رس (مثلاً اینکه زهکشی یکطرفه است یا دوطرفه) ندارد.

۱۲- (۴)

در این سؤال با توجه به اینکه اطلاعات مربوط به مقادیر تنش‌ها و بار وارده داده شده است و مقدار C_c نیز معلوم است، با یک مسئله دسته دوم مواجهیم که برای حل آن از روش رسم نمودار تحکیم استفاده می‌کنیم. بدین منظور طبق گام‌بندی گفته شده در متن درس، خواهیم داشت:

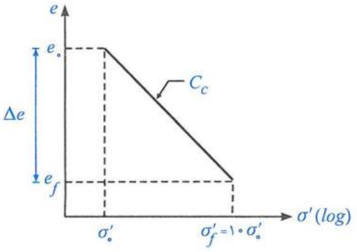
گام اول: $OCR = 1$ است و خاک رس از نوع عادی تحکیم‌یافته می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت: $\sigma'_c = \sigma'_0$

گام دوم: با توجه به اطلاعات صورت سؤال، تنش نهایی در وسط رس برابر است با:

$$\sigma'_f = \sigma'_0 + \boxed{\Delta\sigma'} = \sigma'_0 + 9\sigma'_0 = 10\sigma'_0$$

طبق صورت سؤال $\Delta\sigma' = 9\sigma'_0$

گام سوم: حال با توجه به عادی تحکیم یافته بودن خاک رس و مقادیر تنش‌ها، نمودار تحکیم آن به‌سادگی و به‌صورت زیر ترسیم می‌شود:



گام چهارم: در ادامه از نمودار رسم شده در گام سوم استفاده کرده و مقدار Δe را به‌دست می‌آوریم:

$$\Delta e = C_c \log(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_0}) = 0/3 \boxed{\log\frac{10\sigma'_0}{\sigma'_0}} = 0/3$$

$\log 10 = 1$

گام پنجم: در نهایت نشست تحکیم این خاک برابر می‌شود با:

$$\omega G_s = S_r e \xrightarrow{S_r = 1} 0/4\times 2/5 = 1\times e_0 \Rightarrow e_0 = 1$$

$$\Delta H = \frac{H_0}{1+e_0}\Delta e = \frac{500}{1+1}\times 0/3 = 75\,cm$$

۱۳- (۲)

با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، مشابه با تست قبل از روش رسم نمودار تحکیم استفاده می‌کنیم:

گام اول: $OCR = ۱$ است و خاک رس عادی تحکیم یافته می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت:

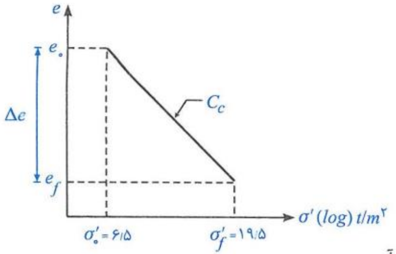
$$\sigma'_c = \sigma'_\circ = \sum(\gamma' z)_i = \boxed{۱/۵} \times ۱ + (۱/۸ - ۱) \times ۵ + (۱/۵ - ۱) \times \boxed{\frac{۴}{۲}} = ۱/۵ + ۴ + ۱ = ۶/۵\, t/m^۲$$

($۱/۵ \rightarrow \gamma_d = ۱/۵\, gr/cm^۳ = ۱/۵\, t/m^۳$ ؛ $\frac{۴}{۲} \rightarrow$ در وسط لایهٔ رسی)

گام دوم: در اثر اجرای خاکریز، تنش مؤثر نهایی در وسط لایهٔ رس برابر می‌شود با:

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۶/۵ + ۲/۶ \times ۵ = ۱۹/۵\, t/m^۲$$

گام سوم: حال با توجه به عادی تحکیم یافته بودن خاک رس و مقادیر تنش‌ها، نمودار تحکیم آن به‌سادگی و به‌صورت مقابل رسم می‌شود:



گام چهارم: در ادامه از نمودار رسم شده در گام قبل استفاده کرده و مقدار Δe را به‌دست می‌آوریم:

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_\circ}\right) = ۰/۸ \times \boxed{\log \frac{۱۹/۵}{۶/۵}} = ۰/۸ \times ۰/۵ = ۰/۴$$

($\rightarrow \log ۳ = ۰/۵$)

گام پنجم: در نهایت مقدار نشست تحکیمی خاک رس برابر می‌شود با:

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{۱ + e_\circ} \Delta e = \frac{۴}{۱ + ۱/۵} \times ۰/۴ = ۰/۶۴\, m = ۶۴\, cm$$

۱۴- (۱)

مشابه با دو تست قبل، مقدار نشست تحکیم را با استفاده از نمودار تحکیم به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

گام اول: طبق اطلاعات داده شده در صورت سؤال، خاک رس عادی تحکیم‌یافته می‌باشد و $OCR = ۱$ است، بنابراین می‌توان گفت:

$$\sigma'_c = \sigma'_\circ = \sum(\gamma' z)_i = \boxed{۱۶ \times ۱} + \boxed{(۲۰ - ۱۰) \times \frac{۴}{۲}} = ۳۶\, kPa$$

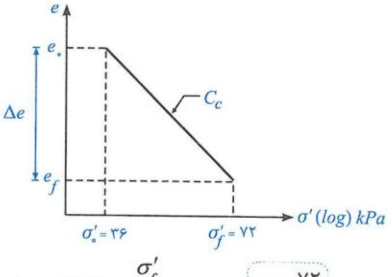
($۱۶ \times ۱ \leftarrow$ خاک ماسه‌ای ؛ $(۲۰-۱۰)\times\frac{۴}{۲} \rightarrow$ وسط رس اشباع)

گام دوم: تنش نهایی ایجاد شده در وسط لایهٔ رسی ناشی از بار وارد شده بر روی پی بوده و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} \sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' \\ \Delta\sigma' = \dfrac{P}{(B+z)(L+z)} = \dfrac{۱۴۴۰}{(۲ + \frac{۴}{۲}) \times (۸ + \frac{۴}{۲})} = ۳۶\, kPa \end{cases} \Rightarrow \sigma'_f = ۳۶ + ۳۶ = ۷۲\, kPa$$

(روش تقریبی ۲ به ۱ : $\Delta\sigma'$)

گام سوم: در ادامه مشابه با دو تست قبلی، نمودار تحکیم خاک رس را رسم می‌کنیم:



گام چهارم: حال از روی نمودار تحکیم، Δe را می‌یابیم:

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_\circ}\right) = ۰/۵ \times \boxed{\log \frac{۷۲}{۳۶}} = ۰/۱۵$$

($\rightarrow \log ۲ = ۰/۳$)

گام پنجم: در نهایت با جایگذاری Δe در رابطهٔ کلی تغییرشکل، ΔH را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{۱ + e_\circ} \Delta e = \frac{۴۰۰}{۱ + ۰/۶} \times ۰/۱۵ = ۳۷/۵\, cm$$

۱۵- (۴)

مشابه با تست‌های قبل، برای حل این سؤال از روش رسم نمودار تحکیم استفاده می‌کنیم:

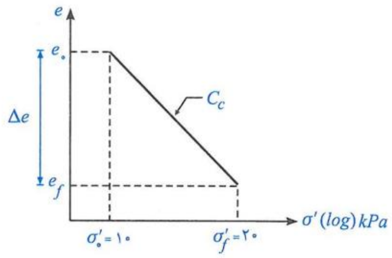
گام اول: از آنجاکه در صورت سؤال اشاره شده است که خاک رس عادی تحکیم‌یافته می‌باشد، بنابراین $\sigma'_c = \sigma'_\circ$ بوده و مقدار آنها در وسط لایهٔ رسی برابر است با:

$$\sigma'_c = \sigma'_\circ = \gamma' \underbrace{z}_{\text{وسط لایه}} = (۲۰-۱۰)\times\frac{۲}{۲} = ۱۰\,kPa$$

گام دوم: در اثر بارگذاری، تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در وسط لایهٔ رسی برابر می‌شود با:

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۱۰+۱۰ = ۲۰\,kPa$$

گام سوم: حال مشابه با تست‌های قبلی، نمودار تحکیم خاک رس را رسم می‌کنیم:



گام چهارم: در ادامه از روی نمودار، Δe را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_\circ}\right) = ۰/۳\times \underbrace{\log\frac{۲۰}{۱۰}}_{\log ۲ = ۰/۳} = ۰/۳\times ۰/۳ = ۰/۰۹$$

گام پنجم: در نهایت با جایگذاری Δe در رابطهٔ کلی تغییرشکل، ΔH را می‌یابیم:

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{۱+e_\circ}\Delta e = \frac{۲۰۰}{۱+۱}\times ۰/۰۹ = ۹\,cm$$

۱۶- (۳)

مشابه با تست‌های قبلی از روش نمودار تحکیم استفاده می‌کنیم:

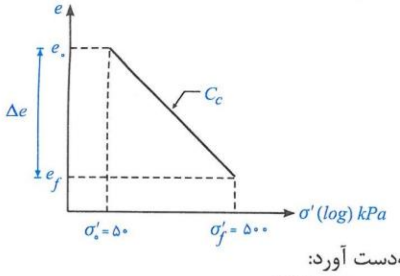
گام اول: در این سؤال OCR خاک رسی داده نشده است و اطلاعات تاریخچهٔ بارگذاری آن را نیز نداریم، بنابراین فرض می‌کنیم خاک رس عادی تحکیم یافته است. پس $\sigma'_c = \sigma'_\circ$ بوده و مقدار آنها در نقطهٔ A برابر است با:

$$\sigma'_c = \sigma'_\circ = \gamma' \underbrace{z = (۲۰-۱۰)\times ۵}_{\text{در نقطهٔ } A} = ۵۰\,kPa$$

گام دوم: تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در نقطهٔ A برابر است با:

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۵۰+۴۵۰ = ۵۰۰\,kPa$$

گام سوم: حال مشابه با تست‌های قبلی، نمودار تحکیم این خاک را به‌سادگی و به‌صورت زیر رسم می‌کنیم:

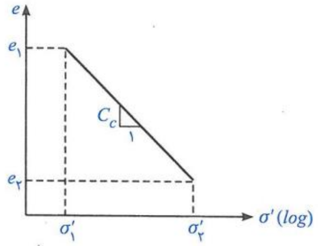


گام چهارم: در ادامه می‌توان مقدار Δe و از آنجا e_f این خاک را در نقطهٔ A به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_\circ}\right) = ۰/۲۵\times \underbrace{\log\frac{۵۰۰}{۵۰}}_{\log ۱۰ = ۱} = ۰/۲۵ \Rightarrow e_\circ - e_f = ۰/۲۵ \Rightarrow ۱-e_f = ۰/۲۵ \Rightarrow e_f = ۰/۷۵$$

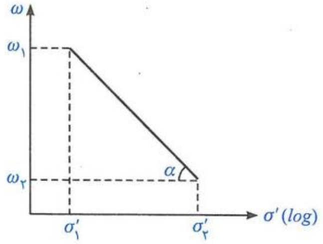
۱۷- (۲)

می‌دانیم شیب نمودار تحکیم برای خاک رس عادی تحکیم‌یافته مطابق شکل زیر، برابر C_c می‌باشد:



$$C_c = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱}\right)}$$

حال اگر نمودار $\omega - \log \sigma'$ را در نظر بگیریم و شیب این نمودار را با $\tan \alpha$ نمایش دهیم، در آن‌صورت خواهیم داشت:



$$\tan \alpha = \frac{\Delta \omega}{\log\left(\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱}\right)}$$

از طرفی طبق روابط وزنی و حجمی، رابطهٔ $\Delta\omega$ و Δe به‌صورت زیر است:

$$\omega G_s = \underbrace{S_r}_{S_r = ۱ \text{ خاک اشباع}} e \Rightarrow \omega = \frac{e}{G_s} \Rightarrow \Delta\omega = \frac{\Delta e}{G_s}$$

پس در نهایت $\tan \alpha$ در نمودار $\omega - \log \sigma'$ برابر می‌شود با:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta \omega}{\log\left(\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱}\right)} = \frac{\frac{\Delta e}{G_s}}{\log\left(\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱}\right)} = \frac{۱}{G_s} \underbrace{\frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱}\right)}}_{C_c} = \frac{C_c \text{ (ضلع مقابل)}}{G_s \text{ (ضلع مجاور)}}$$

بنابراین شیب نمودار مذکور مطابق گزینهٔ (۲) می‌باشد.

۱۸- (۲)

برای محاسبهٔ درصد رطوبت نهایی خاک باید از رابطهٔ وزنی و حجمی $\omega\, G_s = S_r \,.\, e$ استفاده کنیم که چون G_s و S_r معلوم هستند ($S_r = ۱ ,\ G_s = ۲/۵۵$)، لازم است تا ابتدا e نهایی خاک (e در آخر تحکیم) را به‌دست آوریم. بنابراین مشابه تست (۱۶) عمل کرده و می‌نویسیم:

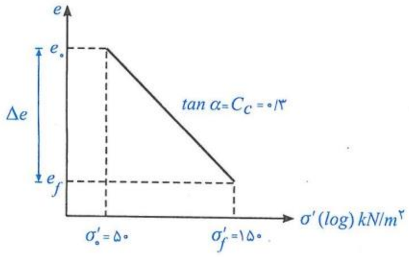
گام اول: با توجه به نمودار تحکیم، داده شده در صورت سؤال خاک رس عادی تحکیم یافته است، بنابراین $\sigma'_c = \sigma'_۰$ بوده و مقدار آنها در وسط لایهٔ رسی برابر است با:

$$\sigma'_c = \sigma'_۰ = \sum(\gamma' z)_i = (۲۰-۱۰)\times ۳ + (۲۰-۱۰)\times \frac{۴}{۲} = ۵۰\ kN/m^۲$$

گام دوم: تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در وسط خاک رس برابر می‌شود با:

$$\sigma'_f = \sigma'_۰ + \Delta\sigma' = ۵۰ + ۱۰۰ = ۱۵۰\ kN/m^۲$$

گام سوم: حال نمودار تحکیم خاک را به‌صورت زیر کامل می‌کنیم:



گام چهارم: در این مرحله Δe و از آنجا e_f خاک را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_\circ}\right) = ۰/۳ \times \boxed{\log\frac{۱۵۰}{۵۰}} = ۰/۱۵ \Rightarrow e_\circ - e_f = ۰/۱۵ \Rightarrow ۱ - e_f = ۰/۱۵ \Rightarrow e_f = ۰/۸۵$$

$\log ۳ = ۰/۵$

و در نهایت درصد رطوبت خاک در پایان تحکیم را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$\omega G_s = S_r e \xrightarrow{S_r = ۱} \omega_f \times ۲/۵۵ = ۱ \times ۰/۸۵ \Rightarrow \omega_f = \frac{۱}{۳} \text{ یا } ۳۳\%$$

۱۹- (۳)

با توجه به رابطهٔ داده شده در سؤال به نظر می‌رسد که باید از روش رسم نمودار تحکیم استفاده کرده، Δe و سپس ΔH را بیابیم. البته با کمی دقت می‌توان دریافت که نیازی به رسم نمودار و محاسبهٔ Δe از روی آن (طی گام‌های سوم و چهارم) نمی‌باشد، چرا که رابطهٔ محاسبهٔ ΔH در صورت سؤال داده شده است. بنابراین حل مسئله را با کمی تغییر و به‌صورت زیر انجام می‌دهیم.

گام اول: چون خاک رس عادی تحکیم یافته است، $\sigma'_c = \sigma'_\circ$ بوده و مقدار آنها برابر است با:

$$\sigma'_c = \sigma'_\circ = \gamma' z = (۲۰ - ۱۰) \times \frac{۸}{۲} = ۴۰\, kPa$$

گام دوم: تنش مؤثر نهایی در وسط لایهٔ رس برابر می‌شود با:

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۴۰ + ۲ \times ۲۰ = ۸۰\, kPa$$

در ادامه مشابه تمرین (۲۰)، مستقیماً ΔH خاک را به‌دست می‌آوریم:

$$\begin{cases} \Delta H = \dfrac{H_\circ}{۱ + e_\circ}\left[C_r \log\dfrac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ} + C_c \log\dfrac{\sigma'_f}{\sigma'_c}\right] \\ \sigma'_c = \sigma'_\circ = ۴۰\, kPa \Rightarrow \log\dfrac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ} = \log ۱ = ۰ \\ e = ۰/۹ - ۰/۲۵ \log\dfrac{\sigma'}{۱۶} \Rightarrow e_\circ = ۰/۹ - ۰/۲۵ \log\dfrac{\sigma'_\circ}{۱۶} = ۰/۹ - ۰/۲۵ \boxed{\log\dfrac{۴۰}{۱۶}} = ۰/۸ \end{cases}$$

$\log\frac{۱۰}{۴} = \log ۱۰ - ۲\log ۲ = ۱ - ۲ \times ۰/۳ = ۰/۴$

$$\Rightarrow \Delta H = \frac{۸۰۰}{۱ + ۰/۸} \times \left[۰ + ۰/۲۵ \boxed{\log\frac{۸۰}{۴۰}}\right] \simeq ۳۳\, cm$$

$\log ۲ = ۰/۳$

توجه: برای حل این سؤال می‌توانستید با توجه به اینکه رابطهٔ نسبت تخلخل خاک با تنش مؤثر داده شده است، از روش اول (مسائل دسته اول) نیز استفاده کنید:

$$e = ۰/۹ - ۰/۲۵ \log\frac{\sigma'}{۱۶} \Rightarrow \begin{cases} e_\circ = ۰/۹ - ۰/۲۵ \log\dfrac{۴۰}{۱۶} = ۰/۸ \\ e_f = ۰/۹ - ۰/۲۵ \log\dfrac{۸۰}{۱۶} = ۰/۷۲۵ \end{cases} \Rightarrow \Delta e = e_\circ - e_f = ۰/۰۷۵$$

$$\frac{\Delta H}{H_\circ} = \frac{\Delta e}{۱ + e_\circ} \Rightarrow \frac{\Delta H}{۸۰۰} = \frac{۰/۰۷۵}{۱ + ۰/۸} \Rightarrow \Delta H = ۳۳/۳\, cm$$

۲۰- (۱)

با توجه به نمودار تحکیم داده شده در صورت سؤال، مشخص است که خاک رس پیش تحکیم یافته می‌باشد. همچنین از روی نمودار ملاحظه می‌شود که:

$$\sigma'_c = ۱۱۴\, kN/m^۲ \text{ و } C_c = \frac{۱}{۴} = ۰/۲۵ \text{ و } C_s = \frac{۱}{۲۰} = ۰/۰۵$$

که البته این مقادیر در ادامهٔ حل مسئله استفاده می‌شوند. حال مطابق با گام‌بندی گفته شده در متن درس، به حل این تست می‌پردازیم:

گام اول و دوم: همانطور که گفتیم خاک رس پیش‌تحکیم یافته بوده و $\sigma'_c = ۱۱۴\, kN/m^۲$ می‌باشد. همچنین $\sigma'_\circ$ و σ'_f یعنی تنش‌های مؤثر اولیه و نهایی ایجاد شده در وسط این لایهٔ رسی برابر هستند با:

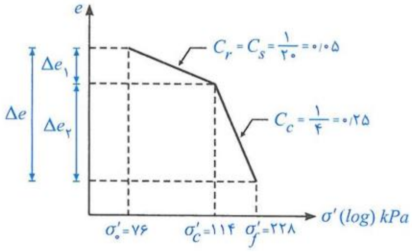
$$\sigma'_\circ = \sum(\gamma' z)_i = \boxed{۱۷ \times ۲} + \boxed{(۲۱ - ۱۰) \times ۲} + \boxed{(۲۰ - ۱۰) \times \frac{۴}{۲}} = ۳۴ + ۲۲ + ۲۰ = ۷۶\, kPa$$

(ماسهٔ خشک) (ماسهٔ اشباع) (وسط لایهٔ رسی)

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۷۶ + \boxed{۱۹ \times ۸} = ۲۲۸\, kPa$$

(اضافه تنش خاکریز)

گام سوم: مقادیر $\sigma'_\circ$، σ'_c و σ'_f را روی نمودار تحکیم نمایش می‌دهیم:



گام چهارم: حال از روی نمودار فوق Δe را می‌یابیم:

$$\Delta e = \Delta e_۱ + \Delta e_۲ = C_r\ log\ (\frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ}) + C_c\ log\ (\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c})$$

$$= ۰/۰۵ \times \boxed{log\ \frac{۱۱۴}{۷۶}} + ۰/۲۵ \times \boxed{log\ \frac{۲۲۸}{۱۱۴}} = ۰/۰۵ \times ۰/۲ + ۰/۲۵ \times ۰/۳ = ۰/۰۸۵$$

$\to log\ ۲ = ۰/۳$

$\to log\ \frac{۳}{۲} = log\ ۳ - log\ ۲ = ۰/۵ - ۰/۳ = ۰/۲$

گام پنجم: در نهایت با جایگذاری Δe در رابطهٔ کلی تغییرشکل، ΔH را به‌دست می‌آوریم:

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{۱ + \boxed{e_\circ}}\ \Delta e = \frac{۴۰۰}{۱+۱} \times ۰/۰۸۵ = ۱۷\ cm$$

$\to e_\circ = ۱$ طبق نمودار تحکیم

۲۱- (۱)

$$\begin{cases} D = \dfrac{۱}{m_v} \\ m_v = \dfrac{(\frac{\Delta H}{H_\circ})}{\Delta \sigma'} = \dfrac{\frac{\Delta e}{۱+e_\circ}}{\Delta \sigma'} = \boxed{\dfrac{\Delta e}{\Delta \sigma'}} \times \dfrac{۱}{۱+e_\circ} = \dfrac{a_v}{۱+e_\circ} \end{cases} \Rightarrow D = \frac{۱+e_\circ}{a_v}$$

$\to a_v$

۲۲- (۱)

رابطهٔ ضریب تغییر حجم (m_v) را به‌صورت زیر در نظر بگیرید:

$$m_v = \frac{(\frac{\Delta V}{V_\circ})}{\Delta \sigma'}$$

در این سؤال، اضافه تنش مؤثر روی نمونه در لحظهٔ مورد نظر برابر است با:

$$\Delta \sigma' = \boxed{q} - \boxed{\Delta u} = ۱ - ۰/۲ = ۰/۸\ kg/cm^۲$$

(q ←) کل بار وارد شده

(Δu ←) اضافه فشار آب حفره‌ای

بنابراین ضریب m_v برابر می‌شود با:

$$m_v = \frac{(\frac{۱۰۰ - ۸۴}{۱۰۰})}{۰/۸} = ۰/۲\ cm^۲/kg$$

۲۳- (۱)

همانگونه که در تست شمارهٔ (۱۷) نیز دیدید، رابطهٔ تغییرات رطوبت با تغییرات نسبت تخلخل به‌صورت زیر می‌باشد که از طریق آن می‌توان Δe را به‌دست آورد:

$$\Delta \omega = \frac{\Delta e}{G_s} \Rightarrow \Delta e = G_s\ \Delta \omega = ۲/۵ \times (۰/۴ - ۰/۳) = ۰/۲۵$$

حال در ادامه ضریب تغییر حجم را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$m_v = \frac{(\frac{\Delta H}{H_\circ})}{\Delta \sigma'} = \frac{\frac{\Delta e}{۱+e_\circ}}{\Delta \sigma'} = \frac{\Delta e}{۱+e_\circ} \times \frac{۱}{\Delta \sigma'} = \frac{۰/۲۵}{۱+۱} \times \frac{۱}{(۲۰۰ - ۷۵)} = ۱۰^{-۳}\ m^۲/kN$$

(۳) -۲۴

ابتدا با استفاده از رابطهٔ کلی تغییر شکل، Δe و از آنجا e_f را در پایان تحکیم می‌یابیم:

$$\frac{\Delta H}{H_\circ}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ} \Rightarrow \frac{1}{10}=\frac{\Delta e}{1+0/6} \Rightarrow \Delta e=0/16 \Rightarrow e_\circ-e_f=0/16 \Rightarrow 0/6-e_f=0/16 \Rightarrow e_f=0/44$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید، با توجه به گزینه‌ها، پاسخ (۳) درست است و نیازی به محاسبهٔ q نمی‌باشد. اما اگر بخواهیم q را نیز به‌دست آوریم، به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\begin{cases}\Delta H=H_\circ m_v\,\Delta\sigma' \\ \text{سربار گسترده در سطح خاک} \Rightarrow \Delta\sigma'=q\end{cases} \Rightarrow \Delta H=H_\circ m_v\,q \Rightarrow 1=10\times0/004\times q \Rightarrow q=25\,kPa$$

(۴) -۲۵

$$\text{ضریب تغییر حجم}: m_v=\frac{\Delta H}{H_\circ}\times\frac{1}{\Delta\sigma'}=\frac{\Delta e}{1+e_\circ}\times\frac{1}{\Delta\sigma'}=\frac{0/175}{1+0/5}\times\frac{1}{(45-10)}=0/0033\,\frac{1}{kPa}$$

$$\text{مدول سختی محصور شده}: D=\frac{1}{m_v}=\frac{1}{0/0033}=300\,kPa$$

$$\text{ضریب فشردگی حجمی}: a_v=m_v(1+e_\circ)=0/0033\times(1+0/5)=0/005$$

(۲) -۲۶

ابتدا مقدار نشست تحکیم هر یک از پی‌ها را با استفاده از ضریب m_v به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم. توجه کنید که در این حالت اضافه تنش مؤثر در وسط لایهٔ رسی در زیر هر پی، با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱ محاسبه می‌شود.

● پی A:

$$\begin{cases}\Delta H_A=H_\circ m_v\,\Delta\sigma' \\ \Delta\sigma'=\dfrac{P}{(B+z)^2}=\dfrac{640}{(2+\underbrace{6}_{5+\frac{2}{2}\,\text{وسط رس در زیر پی}\,A})^2}=10\,kPa\end{cases} \Rightarrow \Delta H_A=(2)\times(5\times10^{-3})\times(10)=0/1\,m=10\,cm$$

● پی B:

$$\begin{cases}\Delta H_B=H_\circ m_v\,\Delta\sigma' \\ \Delta\sigma'=\dfrac{P}{(B+z)^2}=\dfrac{640}{(2+\underbrace{6}_{3+\frac{6}{2}\,\text{وسط رس در زیر پی}\,B})^2}=10\,kPa\end{cases} \Rightarrow \Delta H_B=(6)\times(5\times10^{-3})\times(10)=0/3\,m=30\,cm$$

حال نشست نامتقارن این دو پی نسبت به هم برابر می‌شود با:

$$\Delta H_{\text{نامتقارن}}=\Delta H_B-\Delta H_A=30-10=20\,cm$$

(۴) -۲۷

با توجه به مقادیر داده شده برای نشست‌های آنی و مجاز، حداکثر نشست تحکیمی خاک برابر می‌شود با:

$$\begin{cases}\Delta H_{\text{کل}}=\Delta H_{\text{آنی}}+\Delta H_{\text{تحکیم}} \\ \Delta H_{\text{کل}}\le\Delta H_{\text{مجاز}}=45\,cm\end{cases} \Rightarrow 5+\Delta H_{\text{تحکیم}}\le45 \Rightarrow \Delta H_{\text{تحکیم}}\le40\,cm \text{ یا } 0/4\,m$$

همچنین چون ضریب m_v داده شده است، مسئله از نوع سوم بوده و نشست تحکیم را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{cases}\Delta H_{\text{تحکیم}}=H_\circ m_v\,\Delta\sigma' \\ \text{روش تقریبی ۲ به ۱ برای پی مربعی}: \Delta\sigma'=q\dfrac{B^2}{(B+z)^2}=100\times\dfrac{B^2}{(B+\frac{8}{2})^2}=\dfrac{100B^2}{(B+4)^2}\end{cases} \Rightarrow \Delta H_{\text{تحکیم}}=8\times0/002\times\frac{100B^2}{(B+4)^2}\le0/4\,m$$

$$\Rightarrow \frac{B^2}{(B+4)^2}\le0/25 \Rightarrow \frac{B}{B+4}\le0/5 \Rightarrow 2B\le B+4 \Rightarrow B\le4\,m$$

۲۸- (۲)

چون ضریب m_v داده شده است، بنابراین برای محاسبهٔ نشست تحکیم می‌نویسیم:

$$\Delta H = H_{\circ} m_v \Delta\sigma'$$

از آنجاکه ابتدا ۲m خاک‌برداری صورت گرفته و سپس اضافه بار ۱۳۰ kN/m^2 وارد شده است، اضافه تنش مؤثر خالص در سطح خاک برابر است با:

$$\Delta\sigma'_{\text{در سطح خاک}} = 130 - 11\times 2 = 108\ kN/m^2$$

همچنین با استفاده از روش تقریبی ۲ به ۱، $\Delta\sigma'$ در وسط لایهٔ رسی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

روش تقریبی ۲ به ۱ برای پی دایروی: $\Delta\sigma' = q\left(\frac{D}{D+z}\right)^2 = 108\times\left(\frac{2\times 5}{2\times 5+5}\right)^2 = 48\ kPa$

و در نهایت مقدار ΔH برابر می‌شود با:

$$\Delta H = 10\times 10^{-4}\times 48 = 0/048\ m \quad \text{یا} \quad 4/8\ cm$$

۲۹- (۱)

از آنجائیکه ارتفاع آب در پیزومتر نصب شده در نقطهٔ A به اندازهٔ $0/5\ m$ کاهش یافته است، می‌توان نتیجه گرفت که فشار آب حفره‌ای در این نقطه به اندازه $\Delta u = 0/5\ \gamma_w = 0/5\times 10 = 5\ kPa$ کم شده است. از طرفی می‌دانیم طی فرآیند تحکیم، همانقدر که از فشار آب حفره‌ای کم می‌شود، به همان اندازه به تنش مؤثر اضافه می‌گردد. پس در این مدت تنش مؤثر به اندازهٔ $\Delta\sigma' = 5\ kPa$ افزایش داشته است.

اما پیشروی (افزایش) درجهٔ تحکیم در این مدت نیز به‌سادگی قابل تعیین است:

$$\Delta U = \frac{\Delta\sigma'}{q} = \frac{5}{20} = 0/25 \ \text{یا}\ 25\%$$

۳۰- (۴)

برای یک نقطه مثل A، در هر لحظه اختلاف تراز آب در پیزومتر نسبت به تراز آب زیرزمینی (h)، متناظر با Δu_z نقطه در آن لحظه می‌باشد. پس با توجه به درجهٔ تحکیم داده شده، برای نقطهٔ A می‌توان نوشت:

$$U_z = 1 - \frac{\Delta u_z\ \text{موجود}}{\Delta u_{\circ}} \xrightarrow{U_z = 60\% = 0/6} 0/6 = 1 - \frac{\Delta u_z}{2500} \Rightarrow \Delta u_z = 1000\ kg/m^2$$

$$\Delta u_{\circ} \to q = \Delta P = 2500\ kg/m^2$$

حال می‌توان ارتفاع h را به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$\Delta u_z = \gamma_w h \Rightarrow 1000 = 1000\times h \Rightarrow h = 1m$$

۳۱- (۴)

برای شروع، ابتدا مقدار نشست نهایی کل لایهٔ رسی را با توجه به ضریب m_v می‌یابیم:

$$\Delta H = H_{\circ} m_v \Delta\sigma' = (3+1)\times(2\times 10^{-4})\times(3\times 20) = 48\times 10^{-3}\ m = 48\ mm$$

سپس درجهٔ تحکیم متوسط لایه را محاسبه می‌کنیم:

$$U = \frac{U_1H_1 + U_2H_2}{H_1 + H_2} = \frac{0/75\times 3 + 0/95\times 1}{3+1} = \frac{3/2}{4} = 0/8$$

و در نهایت نشست خاک، متناظر با $U = 0/8$ را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow 0/8 = \frac{\Delta H_t}{48} \Rightarrow \Delta H_t = 38/4\ mm$$

۳۲- (۳)

درجهٔ تحکیم در وسط لایه رس به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} U_{z(\text{وسط})} = 1 - \dfrac{\Delta u_{z(=2m)}}{\Delta u_{\circ}} \\ \Delta u_{z(=2m)} = 12\times 2 - 3\times 2^2 = 12\ kPa \end{cases} \Rightarrow U_{z(\text{وسط})} = 1 - \frac{12}{20} = \frac{2}{5}$$

همچنین جهت محاسبهٔ درجهٔ تحکیم متوسط لایه، با توجه به معادلهٔ $\Delta u(z)$ داده شده، می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} U = 1 - \dfrac{\Delta u_{ave}}{q} \\ \Delta u_{ave} = \dfrac{\int_0^{H_0} \Delta u(z)dz}{H_0} = \dfrac{\int_0^{4} (12z - 3z^2)\,dz}{4} = \dfrac{6z^2 - z^3}{4}\Big]_0^4 = \dfrac{6\times 4^2 - 4^3}{4} = 8\,kPa \end{cases} \Rightarrow U = 1 - \dfrac{8}{20} = \dfrac{3}{5}$$

در نهایت نسبت درجهٔ تحکیم در وسط لایه به درجهٔ تحکیم متوسط آن برابر می‌شود با:

$$\frac{U_{z\,(\text{وسط})}}{U} = \frac{(\frac{2}{5})}{(\frac{3}{5})} = \frac{2}{3}$$

۳۳- (۳)

مقدار کل اضافه بار وارد بر خاک برابر است با:

$$q = \gamma h = 20 \times 5 = 100\,kPa$$

حال با توجه به درجهٔ تحکیم در نقطهٔ A ($U_{z(A)} = 40\%$) می‌توان نوشت:

$$U_{z(A)} = 1 - \frac{\Delta u_{z(A)}}{q} \Rightarrow 0/4 = 1 - \frac{\Delta u_{z(A)}}{100} \Rightarrow \Delta u_{z(A)} = 60\,kPa$$

پس در نهایت فشار آب حفره‌ای در این لحظه در نقطهٔ A برابر می‌شود با:

$$u_{\text{کل}\,A} = u_{0A} + \Delta u_{z(A)} = 2\times 10 + 60 = 80\,kPa$$

توجه: درجهٔ تحکیم داده شده، مربوط به نقطهٔ A بوده و درجهٔ تحکیم متوسط لایه نیست.

۳۴- (۳)

درجهٔ تحکیم متوسط خاک برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{2}{4} = 0/5$$

طبق آنچه در متن درس گفته شد، می‌دانیم درجهٔ تحکیم در وسط لایهٔ رس (به‌علت فاصلهٔ زیاد آن از مرزهای زهکش) از درجهٔ تحکیم متوسط لایه کمتر است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$U_{z\,(\text{وسط})} < U = 0/5 \Rightarrow 1 - \frac{\Delta u_{z\,(\text{وسط})}}{q} < 0/5 \Rightarrow \frac{\Delta u_{z\,(\text{وسط})}}{40} > 0/5 \Rightarrow \Delta u_{z\,(\text{وسط})} > 20\,kN/m^2$$

۳۵- (۲)

در آزمایش تحکیم، نشست این نمونهٔ رسی در لحظهٔ $t_{50\%}$ برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow \Delta H_t = U \times \Delta H_\infty = 0/5 \times 5 = 2/5\,mm$$

حال با توجه به اینکه در آزمایش تحکیم، نمونه در شرایط زهکشی دوطرفه قرار دارد، می‌توان در لحظهٔ موردنظر به‌صورت زیر در مورد نقاط بالایی، میانی و پایینی نمونه اظهار نظر کرد:

- نقاط بالایی و پایینی: در این دو نقطه که نزدیک مرزهای زهکش هستند، بلافاصله بعد از بارگذاری اضافه فشار آب حفره‌ای صفر شده و تمام بار $q = 2\,kg/cm^2$ به اضافه تنش مؤثر تبدیل می‌شود، در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\Delta\sigma'_{\text{بالا و پایین نمونه}} = q = 2\,kg/cm^2 \quad , \quad \Delta u_{\text{بالا و پایین نمونه}} = 0$$

- نقطهٔ میانی: می‌دانیم در نقطهٔ وسط لایهٔ رسی، درجهٔ تحکیم کمتر از درجهٔ تحکیم متوسط است. پس می‌توان گفت:

$$U_{z\,(\text{وسط})} < U = 0/5 \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{\Delta\sigma'_{z\,(\text{وسط})}}{q} < 0/5 \Rightarrow \Delta\sigma'_{z(\text{وسط})} < 0/5q = 0/5\times 2 \Rightarrow \Delta\sigma'_{z(\text{وسط})} < 1\,kg/cm^2 \\ \Delta u_{z\,(\text{وسط})} = q - \Delta\sigma'_{z\,(\text{وسط})} > 2 - 1 \Rightarrow \Delta u_{z\,(\text{وسط})} > 1\,kg/cm^2 \end{cases}$$

با توجه به توضیحات داده شده، گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح است.

۳۶- (۱)

برای محاسبهٔ نشست تحکیم پس از شش ماه (ΔH_t)، باید از رابطهٔ زیر استفاده کنیم:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow \Delta H_t = U \times \Delta H_\infty$$

در رابطهٔ بالا U درجهٔ تحکیم متوسط لایه است، ولی درجهٔ تحکیم در وسط رس را می‌توانیم تعیین کنیم که برابر است با:

$$U_{z(\text{وسط})} = ۱ - \frac{\Delta u_{z(\text{وسط})}}{q} = ۱ - \frac{۲۵}{۵۰} = ۰/۵$$

البته می‌دانیم درجهٔ تحکیم در وسط رس، از درجهٔ تحکیم متوسط کمتر است (زیرا این نقطه از زهکش‌ها دور می‌باشد)، بنابراین می‌توان نوشت:

$$U > U_{z(\text{وسط})} = ۰/۵ \Rightarrow \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} > ۰/۵ \Rightarrow \Delta H_t > ۰/۵ \times \Delta H_\infty = ۰/۵ \times \underbrace{۷}_{\text{نشست تحکیم نهایی}} \Rightarrow \Delta H_t > ۳/۵\, cm$$

۳۷- (۴)

ابتدا درجهٔ تحکیم متوسط لایه را زمانی‌که $\Delta H_t = ۳/۵\, cm$ است، می‌یابیم:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{۳/۵}{۷} = ۰/۵$$

طبق مطالب گفته شده در متن درس، در حالت زهکشی یکطرفه هم، درجه تحکیم وسط لایه کمتر از درجهٔ تحکیم متوسط است، بنابراین اینجا هم $U_{z(A)} < U$ خواهد بود.

$$U_{z(A)} = \frac{\text{محو شده } \Delta u_{z(A)}}{q} < U = ۰/۵$$

طبق اطلاعات داده شده در صورت سؤال، در لحظهٔ موردنظر سطح آب در پیزومتر $۱m$ نسبت به ابتدای بارگذاری پایین آمده است. بنابراین مقدار فشار آب حفره‌ای محو شده در نقطهٔ A برابر است با:

$$\text{محو شده } \Delta u_{z(A)} = \gamma_w\, h = ۱۰ \times ۱ = ۱۰\, kPa$$

حال با جایگذاری مقدار $\Delta u_{z(A)}$ محو شده در رابطهٔ درجهٔ تحکیم، مقدار q به‌دست می‌آید:

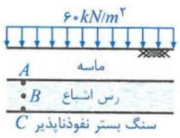
$$\frac{۱۰}{q} < ۰/۵ \Rightarrow q > ۲۰\, kN/m^۲$$

۳۸- (۴)

در لحظهٔ موردنظر یعنی زمانی که نشست تحکیم $۳cm$ شده است، درجهٔ تحکیم متوسط لایهٔ رس برابر است با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} = \frac{۳}{۶} = ۰/۵$$

حال در مورد نقاط مختلف (بالا، وسط و پایین) لایهٔ رس می‌توان گفت:



- نقطهٔ (A): این نقطه در مجاورت مرز زهکش بوده و لذا بلافاصله بعد از بارگذاری تمام اضافه فشار آب حفره‌ای آن صفر می‌شود.
- نقاط (B) و (C): این نقاط از مرز زهکش دورتر بوده و لذا طبق مطالب گفته شدهٔ قبلی درجهٔ تحکیم آنها، از درجهٔ تحکیم متوسط لایه ($U = ۰/۵$) کمتر است، بنابراین می‌توان گفت:

$$U_{z(B)}, U_{z(C)} < U = ۰/۵ \Rightarrow ۱ - \frac{\Delta u_{z(B,C)}}{q} < ۰/۵ \Rightarrow \frac{\Delta u_{z(B,C)}}{۶۰} > ۰/۵ \Rightarrow \Delta u_{z(B,C)} > ۳۰\, kPa$$

با توجه به توضیحات فوق، گزینهٔ (۴) پاسخ صحیح می‌باشد.

۳۹- (۲)

ابتدا با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، نشست تحکیم نهایی (ΔH_∞) لایه رسی را با استفاده از روش رسم نمودار تحکیم محاسبه می‌کنیم:

گام اول: ضریب $OCR = ۲$ می‌باشد، پس خاک رس پیش‌تحکیم یافته بوده و σ'_c به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

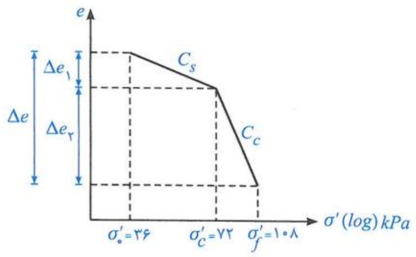
$$\sigma'_۰ = \gamma' z = (۱۷/۲ - ۱۰) \times \frac{۱۰}{۲} = ۳۶\, kPa$$

$$\sigma'_c = OCR \times \sigma'_۰ = ۲ \times ۳۶ = ۷۲\, kPa$$

گام دوم: تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در وسط لایهٔ رسی برابر است با:

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۳۶ + ۱۸ \times ۴ = ۱۰۸\ kPa$$

گام سوم: در ادامه با توجه به اینکه خاک رس پیش تحکیم یافتـه بـوده و $\sigma'_f > \sigma'_c$ می‌باشد، نمودار تحکیم آن، به‌صورت شکل مقابل رسم می‌گردد:



گام چهارم: حال مقدار Δe را از روی نمودار می‌یابیم:

$$\Delta e = \Delta e_۱ + \Delta e_۲ = C_s \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ}\right) + C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c}\right)$$

$$= ۰/۰۶ \times \boxed{\log \frac{۷۲}{۳۶}} + ۰/۲۵ \times \boxed{\log \frac{۱۰۸}{۷۲}} = ۰/۰۶ \times ۰/۳ + ۰/۲۵ \times ۰/۲ = ۰/۰۶۸$$

$\log ۲ = ۰/۳$ ، $\log \frac{۳}{۲} = \log ۳ - \log ۲ = ۰/۵ - ۰/۳ = ۰/۲$

گام پنجم: در نهایت مقدار ΔH_∞ (نشست نهایی تحکیم) برابر می‌شود با:

$$\Delta H = \frac{H_\circ}{۱ + e_\circ}\Delta e = \frac{۱۰ \times ۱۰^۲}{۱ + ۰/۷} \times ۰/۰۶۸ = ۴۰\, cm$$

اما طبق خواستهٔ سؤال، در لحظه‌ای که ٪۳۰ فرآیند تحکیم رخ داده است، مقدار نشست تحکیم (ΔH_t) برابر می‌شود با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow ۰/۳ = \frac{\Delta H_t}{۴۰} \Rightarrow \Delta H_t = ۱۲\, cm$$

۴۰- (۴)

برای شروع ابتدا باید مشخص کنیم که به ازاء $\Delta H_t = ۵\, cm$ (متناظر با زمان شش ماه بعد از بارگذاری)، چند درصد از فرآیند تحکیم اتفـاق افتاده است، یعنی باید درجهٔ تحکیم متوسط (U) را به‌دست آوریم:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty}$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید که برای محاسبهٔ U، باید نشست نهایی تحکیم (ΔH_∞) را بیابیم. بدین منظور با توجه به اطلاعـات داده شـده در صورت سؤال از روش رسم نمودار تحکیم استفاده کرده و می‌نویسیم:

گام اول: $OCR = ۱$ است و خاک رس از نوع عادی تحکیم یافته می‌باشد، بنابراین $\sigma'_c = \sigma'_\circ$ بوده و مقدار آنها در وسط لایهٔ رس برابر می‌شود با:

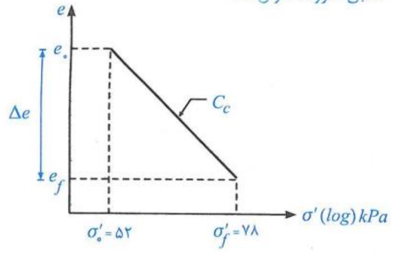
$$\sigma'_c = \sigma'_\circ = \sum(\gamma' z)_i = (۱۹ - ۱۰) \times ۳ + (۲۰ - ۱۰) \times \frac{۵}{۲} = ۵۲\, kPa$$

گام دوم: تنش مؤثر نهایی ایجاد شده در وسط لایهٔ رس برابر است با:

$$\sigma'_f = \sigma'_\circ + \Delta\sigma' = ۵۲ + \boxed{۲۶} = ۷۸\, kPa$$

(۲۶: طبق صورت سؤال)

گام سوم: حال با توجه به اینکه خاک رس عادی تحکیم یافته است، نمـودار تحکـیم آن به‌سادگی و به‌صورت مقابل رسم می‌شود:



گام چهارم: در ادامه مقدار Δe را از روی نمودار می‌یابیم:

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_\circ}\right) = ۰/۲۱ \times \boxed{\log \frac{۷۸}{۵۲}} = ۰/۲۱ \times ۰/۲ = ۰/۰۴۲$$

$\log ۱/۵ = ۰/۲$

گام پنجم: در نهایت با جایگذاری Δe در رابطهٔ کلی تغییرشکل، نشست نهایی خاک رس را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta H_{\infty} = \frac{H_{\circ}}{1+e_{\circ}}\Delta e = \frac{۵۰۰}{۱+۱/۱}\times ۰/۰۴۲ = ۱۰\,cm$$

حالا با معلوم شدن مقدار ΔH_{∞}، درجهٔ تحکیم متوسط این لایه در لحظه‌ای که $\Delta H_t = ۵\,cm$ است برابر می‌شود با:

$$U = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_{\infty}} = \frac{۵}{۱۰} = ۰/۵ \text{ یا } ۵۰\%$$

از طرفی می‌دانیم که فاصلهٔ نقطهٔ وسط لایهٔ رسی از زهکش‌ها زیاد است و در نتیجه درجهٔ تحکیم در این نقطه کمتر از ٪۵۰ خواهد بود:

$$U_{z\,(\text{وسط})} < U = ۵۰\%$$

عبارت فوق نشان می‌دهد که کمتر از ٪۵۰ از کل بار وارد شده $(q = ۲۶\,kN/m^۲)$ به تنش مؤثر تبدیل شده است، بنابراین می‌توان گفت:

$$\Delta\sigma'_{z\,(\text{وسط})} = \text{محو شده } \Delta u_{z\,(\text{وسط})} = \underbrace{q}_{۲۶\,kN/m^۲} - \text{موجود } \Delta u_{z\,(\text{وسط})} < ۰/۵q = ۰/۵\times ۲۶ = ۱۳\,kN/m^۲$$

$$\Rightarrow \text{موجود } \Delta u_{z\,(\text{وسط})} > ۲۶ - ۱۳ = ۱۳\,kN/m^۲$$

توجه: چون درجهٔ تحکیم در وسط لایه رس کمتر از درجهٔ تحکیم متوسط است، می‌توانستیم بگوییم اضافه تنش مؤثر در وسط لایه کمتر از مقدار $\Delta\sigma'_{ave}$ بوده و اضافه فشار آب حفره‌ای در وسط نیز بیشتر از Δu_{ave} خواهد بود. حال تنها یک گزینه است (گزینهٔ ۴) که عبارت ذکر شده در آن به‌صورت « Δu بیشتر از ... » می‌باشد که همان گزینه صحیح است.

۴۱- (۱)

برای تعیین m_v کافیست مقادیر داده شده در صورت سؤال را در رابطهٔ C_v جایگذاری کنیم:

$$C_v = \frac{k}{m_v\,\gamma_w} \Rightarrow ۱/۱\times ۱۰^{-۲} = \frac{۶/۶۷\times ۱۰^{-۶}}{m_v\times \underbrace{۱۰^{-۵}}} \Rightarrow m_v = ۶۰\,cm^۲/kN$$

$\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳ = ۱۰\times ۱۰^{-۶}\,kN/cm^۳ = ۱۰^{-۵}\,kN/cm^۳$

۴۲- (۱)

ابتدا رابطهٔ C_v را در نظر بگیرید و از آنجا k را به‌صورت زیر مشخص کنید:

$$C_v = \frac{k}{m_v\,\gamma_w} \Rightarrow k = C_v\,m_v\,\gamma_w$$

در رابطهٔ بالا C_v و γ_w معلوم می‌باشند، ولی بایستی ضریب تغییر حجم خاک (m_v) را به‌صورت زیر محاسبه کنیم:

$$m_v = \frac{\Delta H}{H_{\circ}}\times\frac{1}{\Delta\sigma'} = \frac{\Delta e}{1+e_{\circ}}\times\frac{1}{\Delta\sigma'} = \left(\frac{۰/۸-۰/۷}{۱+۰/۸}\right)\times\frac{۱}{(۳۶۰-۱۶۰)} = \frac{۱}{۳۶۰۰}\left(\frac{۱}{kPa}\right)$$

پس در نهایت ضریب نفوذپذیری برابر می‌شود با:

$$k = C_v\,m_v\,\gamma_w = ۰/۱۸\times \underbrace{۱۰^{-۶}}\times\frac{۱}{۳۶۰۰}\times ۱۰ = ۰/۵\times ۱۰^{-۹}\,m/sec$$

تبدیل $mm^۲/sec$ به $m^۲/sec$

۴۳- (۲)

رابطهٔ ضریب تحکیم را به‌صورت زیر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$C_v = \frac{k}{m_v\,\gamma_w} \Rightarrow k = C_v\,m_v\,\gamma_w \Rightarrow \frac{k_۱}{k_۲} = \frac{C_{v_۱}}{C_{v_۲}}\times\frac{m_{v_۱}}{m_{v_۲}}$$

طبق صورت سؤال $\frac{C_{v_۱}}{C_{v_۲}} = \frac{۱}{۲}$ است، همچنین می‌دانیم که رابطهٔ m_v با نسبت تخلخل و تغییرات آن به شکل زیر است:

$$m_v = \frac{\Delta e}{1+e_{\circ}}\times\frac{1}{\Delta\sigma'} \xrightarrow{\Delta\sigma' = \Delta\sigma\ (\text{ثابت})} \frac{m_{v_۱}}{m_{v_۲}} = \frac{\Delta e_۱}{\Delta e_۲}\times\frac{1+e_{\circ_۲}}{1+e_{\circ_۱}}$$

$$\frac{m_{v_۱}}{m_{v_۲}} = \left(\frac{۰/۶-۰/۵}{۰/۴۵-۰/۴}\right)\times\left(\frac{۱+۰/۴}{۱+۰/۶}\right) = \frac{۰/۱}{۰/۰۵}\times\frac{۱/۴}{۱/۶} = \frac{۷}{۴}$$

پس در نهایت نسبت $\frac{k_۱}{k_۲}$ برابر می‌شود با:

$$\frac{k_۱}{k_۲} = \frac{C_{v_۱}}{C_{v_۲}}\times\frac{m_{v_۱}}{m_{v_۲}} = \frac{۱}{۲}\times\frac{۷}{۴} = \frac{۷}{۸} = ۰/۸۷۵$$

(۴) -۴۴

ابتدا مقدار T_v متناظر با درجهٔ تحکیم متوسط $U = ۵۰\%$ را می‌یابیم:

$$U < ۶۰\% \Rightarrow T_v = \frac{\pi}{۴}U^۲ = \frac{۳}{۴}\times ۰/۵^۲ = \frac{۳}{۱۶}$$

حال در ادامه ضریب تحکیم (C_v) این خاک را به‌دست می‌آوریم. توجه داشته باشید که در آزمایش تحکیم، زهکشی نمونه دوطرفه بوده و به همین جهت $H_{dr} = \frac{H}{۲}$ است.

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^۲} \Rightarrow \frac{۳}{۱۶} = \frac{C_v \times ۵۰}{(\frac{۲}{۲})^۲} \Rightarrow C_v = \frac{۳}{۸}\times ۱۰^{-۲}\ cm^۲/min$$

در نهایت نیز مقدار k (ضریب نفوذپذیری) برای خاک مذکور به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_v = \frac{k}{m_v\, \gamma_w} \Rightarrow k = C_v\, m_v\, \gamma_w = \frac{۳}{۸}\times ۱۰^{-۲}\times ۰/۰۰۲۴\times ۱ = ۹\times ۱۰^{-۶}\ cm/min$$

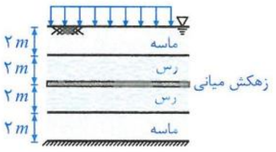
$\gamma_w = ۱\ gr/cm^۳$

(۳) -۴۵

الگوی زهکشی که مقدار H_{dr} را تعیین می‌کند، هیچ نقشی در محاسبهٔ نشست نهایی خاک ندارد. بنابراین با اجرای لایهٔ زهکش در وسط خاک رس اگرچه H_{dr} تغییر می‌کند، ولی مقدار نشست نهایی بی‌تغییر است. حال با توجه به تغییر H_{dr}، طبق مطالب خوانده شده در حالت دوم از بخش $(E-۲)$ می‌توان نوشت:

$$t \propto H_{dr}^۲ \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲$$

پروفیل خاک در حضور زهکش میانی به‌صورت شکل مقابل است:



$$H_{dr_۲} = \frac{۲}{۲} = ۱m \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = \left[\frac{۱}{(\frac{۴}{۲})}\right]^۲ = (\frac{۱}{۲})^۲ = \frac{۱}{۴}$$

پس در این شرایط زمان تحکیم $(t_۲)$، $\frac{۱}{۴}$ برابر شده و در نتیجه سرعت تحکیم ۴ برابر می‌شود.

(۲) -۴۶

ابتدا درجهٔ تحکیم (متوسط) لایهٔ رسی را در زمان سه ماه = $t_۱$ می‌یابیم:

$$\begin{cases} U_۱ = ۱ - \frac{\Delta u_۱}{q} \\ \text{اضافه فشار آب حفره‌ای باقی مانده است.}\ ۸۰\% \Rightarrow \Delta u_۱ = ۰/۸q \end{cases} \Rightarrow U_۱ = ۱ - \frac{۰/۸q}{q} = ۰/۲$$

حال درجه تحکیم خاک را در زمان یک سال = $t_۲$ می‌یابیم که در این حالت چون با یک لایه خاک (با C_v و H_{dr} ثابت) روبرو هستیم، می‌توان مطابق با مطالب خوانده شده در حالت اول از بخش $(E-۲)$ نوشت:

$$t \propto U^۲ \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{U_۲}{U_۱})^۲ \Rightarrow \frac{۱۲\ \text{ماه}}{۳\ \text{ماه}} = (\frac{U_۲}{۰/۲})^۲ \Rightarrow U_۲ = ۰/۴$$

و در نهایت برای محاسبه نشست خاک پس از یک سال خواهیم داشت:

$$U_۲ = \frac{\Delta H_{t_۲}}{\Delta H_\infty} \Rightarrow ۰/۴ = \frac{\Delta H_{t_۲}}{۱} \Rightarrow \Delta H_{t_۲} = ۰/۴m \quad \text{یا} \quad ۴۰cm$$

طبق صورت سؤال $\Delta H_\infty = ۱m$

(۴) -۴۷

جنس و درجهٔ تحکیم خاک‌ها یکسان است، بنابراین براساس حالت دوم از بخش $(E-۲)$، می‌نویسیم:

$$\begin{cases} t \propto H_{dr}^۲ \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ \\ t_۱ = ۵\ min \ ,\ H_{dr_۱} = \frac{۰/۰۴}{۲} = ۰/۰۲\ m \quad \text{(زهکشی دوطرفه)} \\ H_{dr_۲} = ۲\ m \quad \text{(زهکشی یک‌طرفه)} \end{cases} \Rightarrow \frac{t_۲}{۵} = (\frac{۲}{۰/۰۲})^۲ = ۱۰^۴ \Rightarrow t_۲ = ۵۰۰۰۰\ min$$

اما طبق گزینه‌های داده شده بایستی $t_۲$ را برحسب روز محاسبه کنیم، بنابراین می‌نویسیم:

$$t_۲ = \frac{۵۰۰۰۰}{۶۰ \times ۲۴} \simeq ۳۵ \text{ روز}$$

۶۰ ← تبدیل دقیقه به ساعت
۲۴ ← تبدیل ساعت به روز

۴۸- (۱)

چون درجهٔ تحکیم (U) و جنس خاک‌ها (C_v) ثابت است، بنابراین طبق حالت دوم از بخش ($E-۲$) می‌نویسیم:

$$\begin{cases} t \propto H_{dr}^۲ \Rightarrow \dfrac{t_۲}{t_۱} = (\dfrac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ \\ H_{dr_۱} = h_۱ \ , \ H_{dr_۲} = \dfrac{h_۲}{۲} = \dfrac{۲h_۱}{۲} = h_۱ \end{cases} \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{h_۱}{h_۱})^۲ = ۱$$

۴۹- (۳)

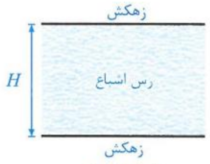
مشابه با تست‌های قبل، طبق مطالب گفته شده در حالت دوم از بخش ($E-۲$) می‌نویسیم:

$$\text{جنس خاک و درصد تحکیم یکسان} \Rightarrow t \propto H_{dr}^۲ \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ = (\frac{۸}{۴})^۲ = ۴ \Rightarrow t_۲ = ۴t_۱ = ۴ \times ۱۰ = ۴۰ \text{ سال}$$

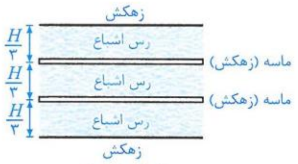
(= ← با فرض زهکشی یکطرفه)

۵۰- (۱)

برای درک بهتر سؤال و حل آن، بیایید شکل‌های زیر را در نظر بگیرید. این شکل‌ها به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ لایهٔ خاک رسی در حالت اولیه و نیز حالت پس از اجرای لایه‌های زهکش (حالت ثانویه) می‌باشند:



(حالت اولیه)



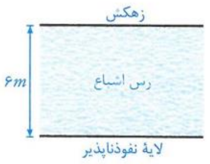
(حالت ثانویه)

حال با توجه به یکسان بودن جنس لایه‌های خاک، طبق مطالب گفته شده، در حالت دوم از بخش ($E-۲$) می‌توان نوشت:

$$t \propto H_{dr}^۲ \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ = \left[\frac{\dfrac{(\frac{H}{۳})}{۲}}{\dfrac{H}{۲}}\right]^۲ = \frac{۱}{۹} \xrightarrow{t_۱ = t} \frac{t_۲}{t} = \frac{۱}{۹} \quad \text{یا} \quad t_۲ = \frac{۱}{۹}t$$

۵۱- (۴)

پروفیل خاک رس در قبل و بعد از اجرای لایهٔ زهکش، به‌صورت شکل‌های زیر است:



(حالت اولیه)

(حالت ثانویه)

حال با توجه به یکسان بودن جنس خاک در لایه‌ها و متفاوت بودن H_{dr} و U، طبق مطالب خوانده شده در حالت سوم از بخش ($E-۲$) می‌نویسیم:

$$t \propto U^۲ \times H_{dr}^۲ \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{U_۲}{U_۱})^۲ \times (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ = (\frac{۵۰}{۲۵})^۲ \times \left[\frac{(\frac{۳}{۲})}{۶}\right]^۲ = ۲^۲ \times (\frac{۱}{۴})^۲ = \frac{۱}{۴} \Rightarrow t_۲ = \frac{۱}{۴}t_۱ = \frac{۱}{۴} \times ۱ = ۰/۲۵ \ year$$

۵۲- (۲)

ابتدا رابطهٔ C_v خاک‌ها را نوشته و نسبت آنها را می‌یابیم:

$$C_v = \frac{k}{m_v\,\gamma_w} \Rightarrow \frac{C_{v_۱}}{C_{v_۲}} = \frac{k_۱}{k_۲} = ۱۶$$

در ادامه با توجه به اینکه C_v، H_{dr} و U در این دو لایه متفاوت هستند، براساس مطالب گفته شده در حالت سوم از بخش ($E-۲$) می‌نویسیم:

$$t \propto \frac{U^۲ H_{dr}^۲}{C_v} \Rightarrow \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{U_۲}{U_۱})^۲ \times (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ \times \frac{C_{v_۱}}{C_{v_۲}} \Rightarrow \frac{۴t}{t} = (\frac{U_۲}{۰/۴})^۲ \times \left[\frac{(\frac{۲}{۲})}{(\frac{۴}{۲})}\right]^۲ \times ۱۶ \Rightarrow ۴ = (\frac{U_۲}{۰/۴})^۲ \times \frac{۱}{۴} \times ۱۶$$

$$\Rightarrow \frac{U_۲}{۰/۴} = ۱ \Rightarrow U_۲ = ۰/۴ \text{ یا } ۴۰\%$$

۵۳- (۴)

در هر دو شکل C_v یکسان است، لذا براساس مطالب گفته شده در حالت سوم از بخش ($E-۲$)، $t \propto U^۲ H_{dr}^۲$ می‌باشد (توجه کنید که در هر دو لایه خاک $U < ۶۰\%$ است) و می‌توان نوشت:

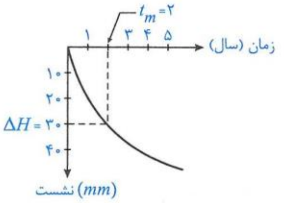
$$\begin{cases} \frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{U_۲}{U_۱})^۲ \times (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ \\ \text{طبق صورت سؤال}: U_۱ = ۴۰\% \;,\; U_۲ = ۲۰\% \;,\; t_۱ = ۱ \text{ سال} \\ \text{با توجه به الگوهای زهکشی}: H_{dr_۱} = \frac{۱۰}{۲} = ۵\,m \text{ (زهکشی دوطرفه)} \;,\; H_{dr_۲} = ۲۰\,m \text{ (زهکشی یک‌طرفه)} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{t_۲}{۱} = (\frac{۲۰}{۴۰})^۲ \times (\frac{۲۰}{۵})^۲ = \frac{۱}{۴} \times ۱۶ = ۴ \Rightarrow t_۲ = ۴ \text{ سال}$$

۵۴- (۲)

برای آنکه نشست خاک را ۳ سال پس از شروع بارگذاری به‌دست آوریم و اثر زمان ساخت پروژه را نیز در آن لحاظ کرده باشیم، در استفاده از نمودار نشست - زمان داده شده، لازم است به‌جای زمان ($t=۳$ سال) از زمان اصلاح‌شدهٔ (t_m) استفاده کنیم. در این شرایط با توجه به اینکه $t_{\text{(زمان موردنظر)}} > t_{c\,\text{(زمان ساخت)}}$ است، می‌نویسیم:

$$t_m = t - \frac{t_c}{۲} = ۳ - \frac{۲}{۲} = ۲ \text{ سال}$$



حال با مراجعه به نمودار ملاحظه می‌شود که به‌ازاء زمان اصلاح‌شدهٔ ۲ سال = t_m، نشست خاک برابر ۳۰ mm خواهد بود.

۵۵- (۴)

ابتدا نشست نهایی لایهٔ خاک رس را می‌یابیم:

$$\Delta H_\infty = H_۰\, m_v\, \Delta\sigma' = (۶) \times (۱۲ \times ۱۰^{-۵}) \times (۵ \times ۲۰) = ۷۲ \times ۱۰^{-۳}\, m = ۷۲\, mm$$

در ادامه به‌منظور محاسبهٔ ΔH_t در زمان خواسته شده، درصد تحکیم خاک در این زمان ($t =$ ۶ ماه پس از اتمام خاک‌ریزی) را به‌دست می‌آوریم که برای این کار لازم است تا زمان داده شده را اصلاح کنیم:

$$t = ۱ \text{ سال} + ۶ \text{ ماه} = ۱/۵ \text{سال} \;,\; t_c = ۱ \text{ سال} \Rightarrow t > t_c \Rightarrow t_m = t - \frac{t_c}{۲} = ۱/۵ - \frac{۱}{۲} = ۱ \text{ (سال)}$$

$$T_v = \frac{C_v\, t_m}{H_{dr}^۲} = \frac{\frac{\pi}{۴} \times ۱}{(\frac{۶}{۲})^۲} = \frac{\pi}{۳۶}$$

$$T_v = \frac{\pi}{۴} U^۲ \Rightarrow \frac{\pi}{۳۶} = \frac{\pi}{۴} U^۲ \Rightarrow U = \frac{۱}{۳} < ۶۰\%$$

پس در نهایت مقدار ΔH_t برابر می‌شود با:

$$U=\frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow \frac{۱}{۳}=\frac{\Delta H_t}{۷۲} \Rightarrow \Delta H_t=۲۴\,mm$$

۵۶- (۲)

نشست‌نهایی خاک رس براساس بارگذاری داده شده (صرف‌نظر از زمان تحکیم و ساخت) برابر می‌شود با:

$$\Delta H_\infty=H_\circ m_v\,\Delta\sigma'=۵\times ۰/۰۰۳\times ۲۰=۰/۳\,m=۳۰\,cm$$

حال اگر بخواهیم نشست خاک را پس از ۶۰ درصد از وقوع تحکیم به‌دست آوریم (صرف‌نظر از آنکه این نشست در چه زمانی اتفاق می‌افتد)، کافیست بنویسیم:

$$U_t=\frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \Rightarrow ۰/۶=\frac{\Delta H_t}{۳۰} \Rightarrow \Delta H_t=۱۸\,cm$$

توجه کنید که در این سؤال، مقدار نشست خاک به ازاء $U=۶۰\%$ خواسته شده است و ما دیگر نیازی به محاسبهٔ t_m نداریم. به عبارت دیگر t_m در محاسبهٔ $U=۶۰\%$ لحاظ شده است.

۵۷- (۳)

تحکیم ثانویه در خاک‌های رسی پر آب اهمیت بیشتری دارد. به‌همین جهت در خاک CH (رس با حد روانی بالا) که جاذب آب و رطوبت بالایی است، این نوع نشست اهمیت بیشتری خواهد داشت.

۵۸- (۴)

نشست الاستیک پی طبق رابطه گفته شده در متن درس، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_e=q\,B\left(\frac{1-\mu_s^۲}{E_s}\right)I_p$$

در هر دو پی نسبت $\frac{L}{B}=۲$ است (در پی دوم $L'=۴B$ و $B'=۲B$ می‌باشد)، بنابراین I_p برای هر دوی آنها یکسان بوده و باتوجه به اینکه خاک زیر پی تغییر نکرده است ($\mu_{s_۱}=\mu_{s_۲}$ ، $E_{s_۱}=E_{s_۲}$)، خواهیم داشت:

$$\frac{S_{e_۲}}{S_{e_۱}}=\frac{q_۲B_۲}{q_۱B_۱}=\frac{\left(\frac{\frac{۱}{۴}P}{۴B\times ۲B}\right)(۲B)}{\left(\frac{P}{۲B\times B}\right)(B)}=\frac{۱}{۸} \Rightarrow S_{e_۲}=\frac{۱}{۸}S_{e_۱}=\frac{۱}{۸}S_e$$

۵۹- (۳)

می‌دانیم نشست الاستیک در زیر یک پی، (بدون عمق مدفون)، از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$S_e=qB\left(\frac{1-\mu_s^۲}{E_s}\right)I_p$$

حال با فرض I_p یکسان برای هر دو پی و یکی بودن خاک زیر پی در هر دو حالت (μ_s و E_s یکسان)، خواهیم داشت:

$$\frac{S_{e_۲}}{S_{e_۱}}=\frac{q_۲}{q_۱}\times\frac{B_۲}{B_۱} \Rightarrow \frac{۱/۵}{۱}=\frac{\frac{P_۲}{۲\times ۲}}{۷۰}\times\frac{۲}{۱} \Rightarrow P_۲=۲۱۰\,N$$

۶۰- (۴)

ابتدا با استفاده از روابط تعادل استاتیکی، عکس‌العمل‌های قائم تکیه‌گاه‌های A و B را می‌یابیم که در واقع نیروهای قائم وارد بر پی‌های A و B هستند:

$$\sum M_A=۰ \Rightarrow R_{y_B}\times ۴=۵\times ۴+(۱۰\times ۴)\times ۲ \Rightarrow R_{y_B}=۲۵\,ton$$

$$\sum F_y=۰ \Rightarrow (۱۰\times ۴)=۲۵+R_{y_A} \Rightarrow R_{y_A}=۱۵\,ton$$

حال نسبت نشست‌های الاستیک را با توجه به یکسان بودن μ، E و I_p (چرا؟) به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{S_{e_B}}{S_{e_A}}=\frac{q_B\times B_B\times\left(\frac{1-\mu_s^۲}{E_s}\right)\times I_p}{q_A\times B_A\times\left(\frac{1-\mu_s^۲}{E_s}\right)\times I_p}=\frac{\left(\frac{۲۵}{۲\times ۲}\right)\times ۲}{\left(\frac{۱۵}{۱/۵\times ۱/۵}\right)\times ۱/۵}=۱/۲۵$$

فصل ۸: مقاومت برشی خاک

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

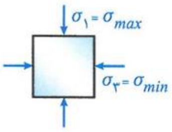
به‌طور کلی ایمنی هر سازه‌ای که بر روی خاک ساخته می‌شود، به دو عامل نشست و مقاومت خاک بستگی دارد. در فصل قبل با نشست خاک آشنا شدیم و فهمیدیم که قسمتی از نشست در هنگام بارگذاری ظاهر می‌شود (نشست آنی) و در صورتی‌که در پروفیل خاک زیر سازه خاک رس اشباع موجود باشد، نشست خاک تمام نشده و تا مدت‌ها پس از ساخت نیز ادامه می‌یابد (نشست تحکیم). حال اگر این نشست‌ها بیش از حد مجاز شوند، کاربری سازه دچار مشکل می‌شود، یعنی با صدمات ایجاد شده در معماری و تأسیسات (مثل جداشدن اتصالات لوله‌ها، ایجاد ترک در دیوارها و سقف، گیر کردن در و پنجره‌ها و ...) عملاً بهره‌برداری از ساختمان غیرممکن می‌گردد. اما در مورد مقاومت خاک خطر جدی‌تر است. اگر خاک زیر سازه مقاومت کافی در برابر بارهای وارده را نداشته باشد، در آن‌صورت سازه فرو می‌ریزد و صدمات وارده بسیار بزرگتر بوده و خطرات جانی نیز محتمل است. در این فصل می‌خواهیم به‌طور کامل در مورد مقاومت خاک بحث کنیم و شما را با مفاهیم مهم مقاومت برشی آشنا نماییم. از این‌رو قسمت‌های مختلف این فصل را که با بیانی کاملاً نو ارائه کرده‌ایم، در قسمت‌های زیر به شما آموزش می‌دهیم:

مقاومت برشی خاک

- پیش فصل: دایرهٔ مور
- قسمت اول: مفاهیم پایهٔ مقاومت برشی
- قسمت دوم: تحلیل روابط گسیختگی المان خاک
- قسمت سوم: نقش آب در مقاومت برشی خاک
- قسمت چهارم: مرور کلی بر آزمایش‌های مقاومت برشی خاک
- قسمت پنجم: انواع آزمایش‌های سه محوری و کاربرد آنها
- قسمت ششم: آشنایی با مفاهیم پس فشار، پارامترهای اسکمپتون و مسیر تنش

دایرهٔ مور

به‌طور کلی در بحث مقاومت خاک، تنش‌های وارد بر یک المان و همچنین مقدار تنش‌ها در صفحات مختلفِ المان خاک، دارای اهمیت می‌باشند که با توجه به این موضوع لازم است تا از بحث **دایرهٔ مور** در مقاومت مصالح، کمک بگیریم. در مکانیک خاک بحث دایرهٔ مور نسبت به مقاومت مصالح ساده‌تر بوده و فقط قسمتی از مفاهیم آن مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین برخی از قراردادهای دایره مور در مکانیک خاک نسبت به مقاومت مصالح متفاوت است که در ادامه به آن می‌پردازیم.



برای شروع این بحث المان شکل مقابل را در نظر بگیرید که **تنش‌های اصلی** σ_1 و σ_3 بر آن وارد شده است. برای محاسبهٔ تنش‌های قائم و برشی در سایر صفحاتِ المان، از دایره مور استفاده می‌کنیم. جهت ترسیم دایرهٔ مور این المان پر کاربرد در مکانیک خاک کافی است تا:

۱) بر خلاف مقاومت مصالح، **تنش‌های فشاری** را **مثبت** در نظر بگیریم.

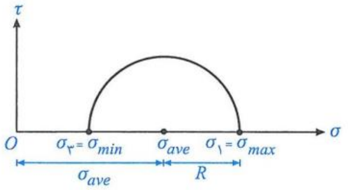
۲) **مرکز دایرهٔ مور** را به‌صورت زیر مشخص کنیم:

$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

۳) **شعاع دایرهٔ مور** را از رابطهٔ زیر محاسبه کنیم:

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

۴) شکل دایرهٔ مور را به‌صورت زیر رسم کنیم:

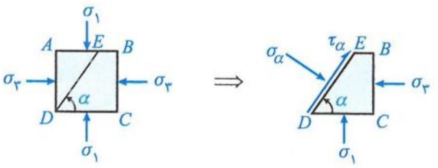


از سوی دیگر برای به‌دست آوردن تنش‌های قائم و برشی در هر صفحهٔ دلخواه، از دو قانون زیر استفاده می‌کنیم:

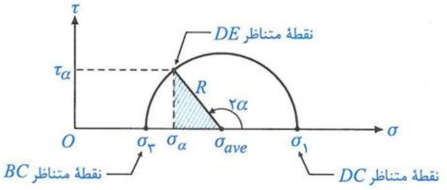
۱) هر صفحه از المان، متناظر با یک نقطه بر روی دایرهٔ مور است.

۲) اگر روی المان از صفحهٔ (۱) به اندازهٔ α در جهت عقربه‌های ساعت (یا خلاف آن) دوران کنیم تا به صفحهٔ (۲) برسیم، در آن‌صورت در دایرهٔ مور از نقطهٔ متناظر با صفحهٔ (۱) باید **به اندازهٔ** 2α **در همان جهت** دوران کنیم تا به نقطهٔ متناظر با صفحهٔ (۲) برسیم.

حال برای درک بهتر این موضوع، المان شکل زیر را در نظر بگیرید که در صفحهٔ DC از آن، تنش‌های قائم و برشی به‌صورت $(\sigma_1, 0)$ می‌باشند و ما می‌خواهیم تنش‌ها در صفحهٔ دلخواه DE (که با امتداد افق و نیز صفحهٔ DC زاویهٔ α می‌سازد) را که به‌صورت $(\sigma_\alpha, \tau_\alpha)$ هستند، به‌دست آوریم:

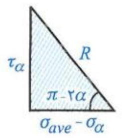


برای این منظور ابتدا دایرهٔ مور تنش‌ها را به‌صورت زیر ترسیم می‌کنیم:



و در ادامه با کمک روابط مثلثاتی، به‌صورت زیر σ_α و τ_α را می‌یابیم:

در نظر گرفتن مثلث هاشور خورده :

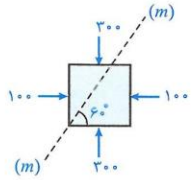


$$\Rightarrow \begin{cases} \sin(\pi - ۲\alpha) = \dfrac{\tau_\alpha}{R} \\ \cos(\pi - ۲\alpha) = \dfrac{\sigma_{ave} - \sigma_\alpha}{R} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sigma_\alpha = \sigma_{ave} - R\cos(\pi - ۲\alpha) \Rightarrow \boxed{\sigma_\alpha = \sigma_{ave} + R\cos ۲\alpha} \\ \tau_\alpha = R\sin(\pi - ۲\alpha) \Rightarrow \boxed{\tau_\alpha = R\sin ۲\alpha} \end{cases}$$

حال با حل یک تمرین، این بحث را کامل می‌کنیم.

تمرین ۱: برای المان نشان داده شده در شکل زیر، ابتدا دایرهٔ مور را رسم کنید و سپس تنش‌های قائم و برشی در صفحهٔ $m-m$ را بیابید. سپس بررسی کنید خطی که از مرکز مختصات بر دایرهٔ مور مماس می‌شود، چه زاویه‌ای با امتداد افق می‌سازد؟

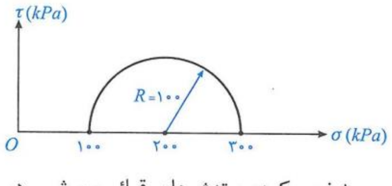


● پاسخ برای شروع ابتدا شعاع R و σ_{ave} را می‌یابیم:

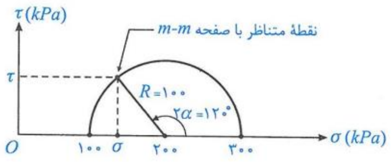
$$R = \frac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲} = \frac{۳۰۰ - ۱۰۰}{۲} = ۱۰۰\ kPa$$

$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲} = \frac{۳۰۰ + ۱۰۰}{۲} = ۲۰۰\ kPa$$

سپس دایرهٔ مور المان را به‌صورت زیر رسم می‌کنیم:



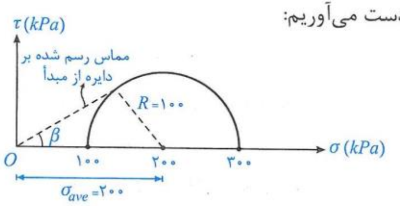
در ادامه موقعیت صفحه $m-m$ را (که زاویهٔ آن در دایرهٔ مور $۲\alpha = ۱۲۰^\circ$ است) روی دایرهٔ مور مشخص کرده و تنش‌های قائم و برشی در این صفحهٔ را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:



$$\sigma = \sigma_{ave} - R\cos(\pi - ۲\alpha) = \sigma_{ave} + R\cos ۲\alpha = ۲۰۰ + ۱۰۰ \times \cos ۱۲۰^\circ = ۱۵۰\ kPa$$

$$\tau = R\sin ۲\alpha = ۱۰۰ \times \sin ۱۲۰^\circ = ۵۰\sqrt{۳}\ kPa$$

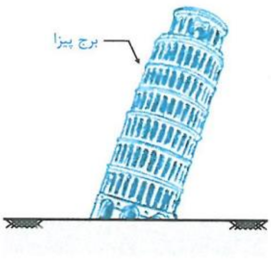
و در نهایت با رسم خط مماس بر دایره از مبدأ (نقطهٔ O)، زاویهٔ این خط با امتداد افق را به‌دست می‌آوریم:



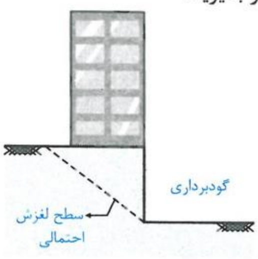
$$\sin\beta = \frac{R}{\sigma_{ave}} = \frac{۱۰۰}{۲۰۰} = \frac{۱}{۲} \Rightarrow \beta = ۳۰^\circ$$

A-۱- مفهوم گسیختگی خاک و اهمیت آن

دو شکل زیر را در نظر بگیرید:



شکل (۱)



شکل (۲)

توضیح شکل سمت چپ (شکل ۱):

شکل سمت چپ برج پیزا در ایتالیا را نشان می‌دهد. این برج هم اکنون که حدود ۸۰۰ سال از ساخت آن می‌گذرد، اگرچه خراب نشده است ولی کاربری خود را از دست داده و در حال حاضر امکان ورود و بازدید آن برای توریست‌ها ممنوع شده است.

دلیل مهندسی: برج پیزا مشکل نشست دارد و این نشست از نوع نشست تحکیم نامتقارن است که در فصل قبل در مورد آن صحبت شد.

توضیح شکل سمت راست (شکل ۲):

شکل سمت راست یک ساختمان نسبتاً بلند را نشان می‌دهد که در مجاورت آن گودبرداری حجیمی انجام شده است. اگر خاک در امتداد سطح لغزش احتمالی بلغزد، در آن‌صورت ساختمان در زمان کوتاهی تخریب می‌شود.

دلیل مهندسی: در صورت لغزش خاک می‌توان گفت، خاک زیر سازه مشکل مقاومتی دارد، یعنی در اثر وزن سازه ذرات خاک روی هم می‌لغزند و نمی‌توانند برش را تحمل کنند. این اتفاق نشان می‌دهد که خاک مشکل مقاومت برشی دارد.

نتیجه‌گیری:

با توجه به دو مورد بالا می‌توان تغییر شکل‌های ایجاد شده در هنگام نشست و گسیختگی خاک را به‌صورت زیر تفسیر کرد:

۱) در فرآیند نشست، تغییر شکل ایجاد شده در خاکِ زیر سازه در اثر فشردگی و نزدیکی دانه‌های خاک به هم می‌باشد. این نوع تغییرشکل‌ها که معمولاً کوچک هستند اگرچه ممکن است کاربری قسمت‌هایی از سازه را مختل کنند ولی باعث تخریب کلی سازهٔ ساخته شده بر روی خاک نمی‌شوند.

۲) هنگامی‌که خاک مشکل مقاومت برشی پیدا می‌کند، در یک سطح خاص دانه‌های خاک بر روی هم می‌لغزند که نتیجهٔ آن بروز تغییرشکل‌های بزرگ در خاک و تخریب کلی سازهٔ ساخته شده بر روی خاک است.

در ادامهٔ این فصل، می‌خواهیم در مورد مقاومت برشی خاک و پارامترهای مرتبط با آن که یکی از مهمترین مباحث مکانیک خاک است، به‌طور مفصل بحث کنیم.

A-۲- آشنایی با پارامترهای مقاومت برشی خاک و رابطهٔ مور- کولمب

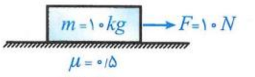
این بحث ارتباط بسیار نزدیکی با مفاهیمی دارد که در فیزیک دبیرستان خوانده‌اید، بنابراین ابتدا آنها را برای شما یادآوری می‌کنیم.

زیر شاخه‌های قسمت اول

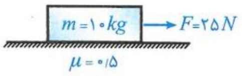
A-۱- مفهوم گسیختگی خاک و اهمیت آن
A-۲- آشنایی با پارامترهای مقاومت برشی خاک و رابطهٔ مور- کولمب
A-۳- کنترل شرایط گسیختگی در پروفیل خاک

مفهوم اصطکاک و لغزش در فیزیک

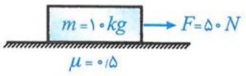
از درس فیزیک به خاطر داریم که بین دو سطح زبر، پارامتری به‌نام ضریب اصطکاک (μ) تعریف می‌شود. با کمک ضریب اصطکاک می‌توان حداکثر نیروی اصطکاک وارده از طرف سطح به یک جسم را از رابطهٔ معروف $F_f = \mu N$ محاسبه کرد که در این رابطه، N عکس‌العمل قائم سطح است که به جسم موردنظر وارد می‌شود. در ادامه به شکل‌های زیر توجه کنید:



شکل (۱)



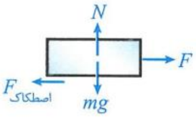
شکل (۲)



شکل (۳)

با توجه به این شکل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) در هر سه شکل فوق می‌توان با نوشتن رابطهٔ تعادل نیروها در امتداد قائم برای جسم، نیروی عکس‌العمل قائم که از طرف سطح بر جسم وارد می‌شود را به‌صورت زیر به‌دست آورد:



$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N = mg = 10 \times 10 = 100\,N \quad (g = 10\,m/s^2)$$

۲) بیشترین نیروی اصطکاکی که می‌تواند از طرف سطح به جسم وارد شود، برابر است با: $F_f = \mu N = 0/5 \times 100 = 50\,N$

۳) در شکل‌های (۱) و (۲) نیروی F قصد دارد که باعث لغزش جسم شود، ولی نمی‌تواند بر اصطکاک غلبه کند. بنابراین جسم ساکن می‌ماند و ما می‌توانیم با نوشتن رابطهٔ تعادل نیروها در امتداد افقی برای جسم، مقدار نیروی اصطکاک لازم برای تعادل جسم را به‌سادگی بیابیم:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{s_1} = F_1 = 10\,N$$

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_{s_2} = F_2 = 25\,N$$

این در حالی است که در شکل (۳) نیروی F با حداکثر مقدار نیروی اصطکاک یعنی F_f برابر بوده و جسم در آستانهٔ لغزش است:

$F_f = F = 50\,N \Rightarrow$ جسم در آستانهٔ لغزش است.

توجه کنید که اگر نیروی $F > 50\,N$ شود، جسم بر روی سطح افقی می‌لغزد.

۴) همانطورکه مشاهده می‌کنید در شکل‌های (۱) و (۲)، نیروی اصطکاک برابر $F_f = \mu N$ نیست و تنها بخشی از آن (F_s) برای تعادل جسم و جلوگیری از لغزش آن، مصرف شده است. حال اگر ضریب اطمینان در برابر لغزش را در شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) از ما بخواهند، در آن‌صورت به‌ترتیب زیر عمل می‌کنیم:

ضریب اطمینان در برابر لغزش (FS) = حداکثر مقدار نیروی مقاوم در برابر لغزش / نیروی سبب لغزش

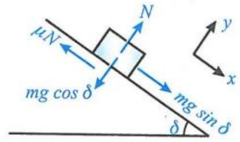
محاسبهٔ FS در حالت‌های مختلف $\Rightarrow$

$FS_1 = \frac{50}{10} = 5 \Rightarrow$ جسم نمی‌لغزد.

$FS_2 = \frac{50}{25} = 2 \Rightarrow$ جسم نمی‌لغزد.

$FS_3 = \frac{50}{50} = 1 \Rightarrow$ جسم در آستانهٔ لغزش است.

۵) معمولاً ضریب اصطکاک بین دو سطح را با تانژانت یک زاویه مثل δ نشان می‌دهند ($\tan\delta$). برای محاسبهٔ δ جسم موردنظر را روی یک سطح شیبدار که زاویهٔ آن با افق قابلیت تغییر دارد، قرار می‌دهیم و سپس این زاویه را به‌تدریج افزایش می‌دهیم تا بفهمیم جسم در چه زاویه‌ای شروع به لغزش می‌کند. این زاویهٔ لغزش، زاویه اصطکاک بین جسم و سطح (یعنی δ) است و داریم:



نیروهای وارده در لحظهٔ لغزش (آستانهٔ لغزش)

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \Rightarrow N = mg\cos\delta \\ \sum F_x = 0 \Rightarrow \mu N = mg\sin\delta \end{cases}$$

$$\Rightarrow \mu mg\cos\delta = mg\sin\delta \Rightarrow \mu = \tan\delta \Rightarrow F_f = N\tan\delta$$

۶ اگر علاوه بر اصطکاک از چسب مقاومی با نیروی F_c در سطح تماس استفاده کنیم، در آن‌صورت حداکثر نیروی مقاوم در برابر حرکت جسم برابر است با:

$$\text{حداکثر نیروی مقاوم} = F_f + F_c = \underbrace{\mu}_{\tan\delta} N + F_c \Rightarrow \boxed{\text{حداکثر نیروی مقاوم} = N\tan\delta + F_c}$$

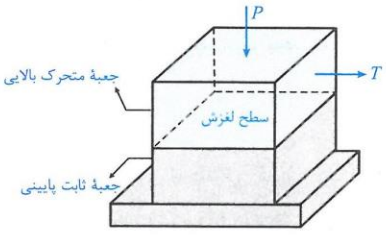
پارامترهای مقاومت برشی خاک

به‌طور کلی هنگامی که ذرات خاک بخواهند در امتداد یک صفحه روی هم بلغزند، دو عامل مانع این کار می‌شود:

۱- عامل اصطکاک ذرات خاک با هم یا همان گیر کردن دانه‌ها در هم

۲- چسبندگی بین ذرات خاک، وقتی در تودهٔ خاک کانی‌های رس وجود داشته باشد.

برای درک بهتر این موضوع به شکل زیر توجه کنید که در آن می‌خواهیم با اعمال نیروی افقی T به جعبهٔ خاک بالایی، این قسمت را نسبت به جعبهٔ خاک پایینی، در سطح لغزش بلغزانیم.

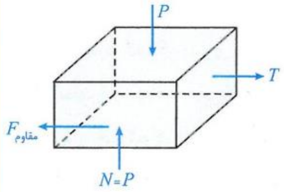


پس از مقدمهٔ فوق، حال با بررسی چند سؤال بحث را ادامه می‌دهیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: با بررسی دیاگرام جسم آزاد جعبهٔ خاک بالایی، نشان دهید که کدام نیروها، نیروهای سبب لغزش و مقاوم در برابر لغزش هستند؟ (از وزن خاک صرف‌نظر کنید.)

● پاسخ: نیروی T، نیروی سبب لغزش است که می‌خواهد جعبهٔ خاک بالایی را به حرکت در آورد و نیروی $F_{\text{مقاوم}}$ نیز جلوی آن را می‌گیرد، پس می‌توان آن را نیروی مقاوم در برابر لغزش دانست.



سؤال ۲: حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش چقدر است؟ (زاویهٔ اصطکاک بین دانه‌های خاک را ϕ در نظر بگیرید.)

● پاسخ: همانطورکه در ابتدای این بحث گفته شد، دو عامل اصطکاک و چسبندگی بین دانه‌های خاک، در برابر لغزش مقاومت می‌کنند و می‌توان نوشت:

$$(F_{\text{مقاوم}})_{max} = F_f + F_c = N\tan\phi + F_c \xrightarrow{N=P} \boxed{(F_{\text{مقاوم}})_{max} = P\tan\phi + F_c}$$

نتیجه: اگر نیروی P حذف شود، نیروی مقاوم ماکزیمم، ترم $P\tan\phi$ را نداشته و مقدار آن کاهش می‌یابد. به زبان ساده‌تر می‌توان گفت، نیروی P باعث محکم شدن دانه‌های خاک در سطح لغزش احتمالی می‌شود و نقش مهمی در مقاومت خاک در سطح لغزش دارد.

سؤال ۳: در علم مکانیک خاک چگونه رابطهٔ $(F_{\text{مقاوم}})_{max} = P\tan\phi + F_c$ را به تنش‌های قائم و برشی در سطح لغزش ارتباط می‌دهند؟

● پاسخ: در لحظهٔ لغزیدنِ سطح خاک (آستانهٔ لغزش)، نیروی T با نیروی $(F_{\text{مقاوم}})_{max}$ برابر می‌شود (مثال‌های اصطکاک از فیزیک دبیرستان را به‌خاطر آورید) و می‌توان نوشت:

$$T = (F_{\text{مقاوم}})_{max} = P\tan\phi + F_c$$

در ادامه با تقسیم طرفین رابطه بر مساحت سطح لغزش (A)، خواهیم داشت:

$$(\frac{T}{A}) = (\frac{P}{A})\tan\phi + (\frac{F_c}{A})$$

در توضیح اجزاء رابطهٔ مذکور می‌توان گفت:

$\frac{T}{A}$ در حالت کلی نشان‌دهندهٔ **تنش برشی سبب لغزش (τ)** است که تا قبل از لغزش با تنش برشی مقاوم در برابر لغزش برابر است. نکتهٔ قابل توجه در مورد τ آن است که در آستانهٔ لغزش (یعنی وضعیت موردنظر ما در این قسمت) مقدار آن برابر حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش است که ما به آن **مقاومت برشی (τ_f)** می‌گوییم. لازم به ذکر است که اندیس f در این حالت، حرف اول کلمهٔ ***failure*** به معنی **گسیختگی** است.

$\frac{P}{A}$ تنش قائم در سطح لغزش است که آن را با σ_f نشان می‌دهیم.

$\frac{F_c}{A}$ معرف نیروی مقاوم چسبندگی در واحد سطح است که آن را با c نشان داده و به آن **چسبندگی خاک** می‌گوییم. توجه کنید که چسبندگی خاک (c) به علت وجود کانی‌های رسی در خاک می‌باشد.

$\tan\phi$ ضریب اصطکاک در سطح لغزش است و همانطورکه در صورت سؤال نیز گفته شد، ϕ زاویه اصطکاک بین دانه‌های خاک است که به آن **زاویه اصطکاک داخلی خاک** می‌گوییم.

حال با توضیحات فوق می‌توان رابطهٔ موجود را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

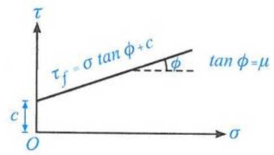
$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c$$

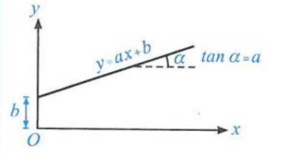
این رابطه، یکی از مهمترین روابط مکانیک خاک است که به رابطهٔ **مور - کولمب** معروف می‌باشد.

سؤال ۴: رابطهٔ مور - کولمب در دستگاه مختصات τ و σ (محور افقی σ و محور قائم τ) به چه صورتی رسم می‌شود؟

پاسخ: برای پاسخ به این سؤال، اگر به شکل‌های زیر توجه کنید، خودتان متوجه همه چیز خواهید شد:

	مختصات تنش $\tau - \sigma$	مختصات $y - x$
تابع	τ_f	y
متغیر	σ	x
پارامتر	$(\tan\phi$ (یا $)\ \phi , c$	$(\tan\alpha$ (یا $)\ a , b$





نتیجه: به c و ϕ **پارامترهای مقاومت برشی خاک** گفته می‌شود که در حالت کلی بستگی به جنس خاک دارند و ثابت می‌باشند. این در حالی است که σ پارامتر متغیر در مقاومت برشی است که اندازهٔ آن به عامل خارجی (بارگذاری) بستگی دارد و مقدار آن می‌تواند توسط ما کم و زیاد شود.

تذکر: در مورد پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت کلی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) عواملی مثل تیزگوشه بودن ذرات خاک، دانه‌بندی مناسب، تراکم بالا و ... باعث افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک می‌شوند.

۲) عواملی مثل افزایش درصد رس در خاک، فراوانی کانی رسی مونت موریلونیت، پیش تحکیمی رس و ... باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شوند.

۳) در خاک‌ها دانه‌ای چسبندگی ناچیز و تقریباً برابر صفر است.

۴) در خاک‌های رسی هر دو پارامتر ϕ و c در تأمین مقاومت برشی خاک نقش دارند، اما در شرایط خاصی که بعداً در مورد آن صحبت خواهیم کرد، زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌تواند صفر شود. در این حالت به خاک رس، **خاک صرفاً چسبنده** گفته می‌شود.

A-۳- کنترل شرایط گسیختگی در پروفیل خاک

پروفیل خاک شکل زیر را در نظر بگیرید که در آن یک المان با تنش‌های اصلی نشان داده شده در شکل، در عمق z از سطح خاک مشخص شده است:

در شکل صفحهٔ قبل، σ_v و σ_h به‌ترتیب تنش‌های قائم و افقی کل در عمق z از سطح خاک می‌باشند که به‌صورت زیر تعیین می‌گردند:

۱) σ_v طبق روابط خوانده شده در فصل پنجم و با فرض اینکه بار q یک بار گسترده در سطح وسیع می‌باشد، برابر است با:

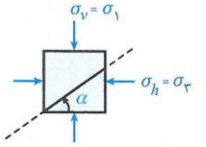
$$\sigma_v = \gamma z + q$$

۲) σ_h به‌صورت ضریبی (معولاً کوچکتر از یک) از σ_v می‌باشد و برابر است با:

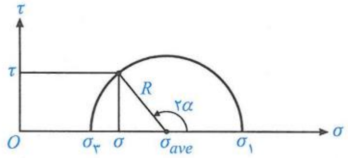
$$\sigma_h = k_\circ \, \sigma_v$$

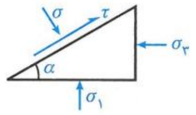
$k_\circ$ ← ضریب فشار سکون* خاک

حال فرض کنید که احتمال لغزیدن خاک در صفحه‌ای از این المان که با افق زاویهٔ α می‌سازد، از ما پرسیده شده است. برای بررسی احتمال لغزش خاک در این صفحه، گام‌های زیر را طی می‌کنیم:



گام اول: با توجه به تنش‌های وارد بر المان، دایرهٔ مور آن را رسم کرده و سپس طبق مطالب گفته شدهٔ قبلی، تنش‌های قائم و برشـی σ و τ را در صفحهٔ α به‌دست می‌آوریم:





$$\begin{cases} \sigma = \sigma_{ave} + R\cos ۲\alpha \\ \tau = R\sin ۲\alpha \end{cases}$$

توجه کنید که τ تنش برشی سبب لغزش در صفحهٔ α است، به‌عبارتی این تنش برشی می‌خواهد صفحهٔ α را بلغزاند.

گام دوم: براساس رابطهٔ مور - کولمب، حداکثر تنش برشی مقاوم در صفحهٔ α را می‌یابیم که در واقع همان مقاومت برشـی (τ_f) خـاک در این صفحه است:

$$\tau_f = \sigma \tan\phi + c$$

به‌عنوان یک موضوع مهم توجه کنید برای یافتن مقاومت برشی خاک در صفحهٔ α، از تنش قائم در صفحهٔ α (یعنی σ) باید اسـتفاده شـود که مقدار آن از روی دایرهٔ مور محاسبه می‌شود.

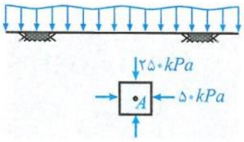
گام سوم: از مقایسه تنش برشی سبب لغزش (τ) با مقاومت برشی خاک (τ_f) در صفحهٔ α، احتمال لغزش خاک در صفحه را به‌صورت زیـر بررسی می‌کنیم:

$$\begin{cases} \tau < \tau_f \;\Rightarrow\; \text{لغزش رخ نمی‌دهد.} \\ \tau = \tau_f \;\Rightarrow\; \text{خاک در آستانهٔ لغزش است.} \\ \tau > \tau_f \;\Rightarrow\; \text{لغزش رخ می‌دهد.} \end{cases}$$

تذکر: براساس بحث فوق می‌توان ضریب اطمینان در برابر گسیختگی در هر صفحهٔ دلخواه مانند α از المان خاک را به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\sigma \tan\phi + c}{\tau}$$

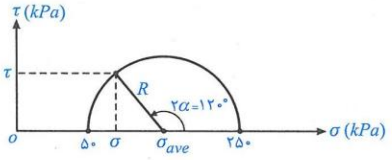
تمرین ۲: در اثر نوعی بارگذاری در سطح زمین، تنش‌های افقی و قائم ایجاد شده در المان نشان داده شـده در نقطـهٔ A از خـاک مطـابق شـکل می‌باشند. اگر زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک $\phi = ۳۷^\circ$ و چسبندگی آن برابر $c = ۲۵$ باشد، در آن‌صورت ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی برشی در صفحه‌ای که با زاویهٔ ۶۰ درجه نسبت به افق از نقطهٔ A می‌گذرد، چقدر است؟ ($\sin ۳۷^\circ = ۰/۶$)

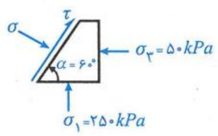


* در مورد ضریب فشار سکون و بحث فشار جانبی سکون، به‌طور مفصل در فصل اول کتاب پی‌سازی سری عمران صحبت شده است.

● حل: برای تعیین ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی برشی (لغزش خاک) مطابق با گام‌بندی گفته شده عمل می‌کنیم:

گام اول: ابتدا با ترسیم دایرهٔ مور، مقادیر σ و τ را در صفحهٔ $\alpha = 60°$ می‌یابیم:





$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{250+50}{2} = 150\ kPa$$

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{250-50}{2} = 100\ kPa$$

$$\sigma = \sigma_{ave} + R\cos 2\alpha = 150 + 100 \times \cos 120° = 100\ kPa$$

$$\tau = R\sin 2\alpha = 100 \times \sin 120 = 50\sqrt{3}\ kPa$$

گام دوم: مقاومت برشی خاک در صفحهٔ $\alpha = 60°$ را به‌دست می‌آوریم:

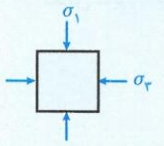
$$\begin{cases} \tau_f = \sigma \tan\phi + c \\ \tan\phi = \dfrac{\sin\phi}{\cos\phi} = \dfrac{\sin 37°}{\cos 37°} = \dfrac{0.6}{0.8} = \dfrac{3}{4} \end{cases} \Rightarrow \tau_f = 100 \times \frac{3}{4} + 25 = 100\ kPa$$

گام سوم: ضریب اطمینان گسیختگی در صفحه α را از تقسیم τ_f بر τ محاسبه می‌کنیم:

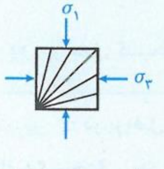
$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{100}{50\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{2\sqrt{3}}{3} > 1 \Rightarrow$$ لغزش رخ نمی‌دهد

بررسی یک موضوع مهم

المان شکل زیر را در نظر بگیرید که تحت تنش‌های اصلی σ_1 و σ_3 قرار گرفته است. احتمالاً شما نیز موافقید که بی‌شمار صفحه در این المان وجود دارد که می‌توان برای آنها ضریب اطمینان در برابر لغزش را محاسبه کرد.

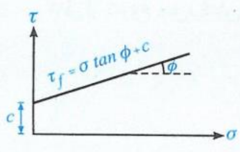


حال اگر بررسی گسیختگی خاک در این المان مطرح شود، آیا می‌توانیم در تمام صفحات، τ_f و τ را با هم مقایسه کرده و ضریب اطمینان را به‌دست آوریم؟

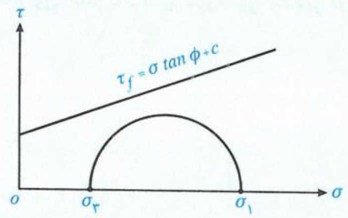


در جواب باید بگوییم که عملاً چنین چیزی ممکن نیست و ما نمی‌توانیم در تمام صفحات، ضریب اطمینان را محاسبه کنیم. در عمل برای کنترل گسیختگی المان مراحل زیر انجام می‌شود:

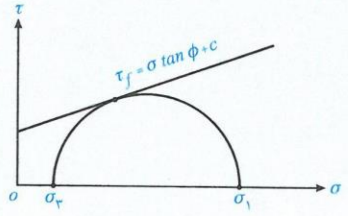
۱) ابتدا خط مور- کولمب در مختصات تنش‌های τ و σ را رسم می‌کنیم:



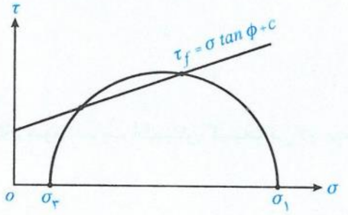
۲ با توجه به المان تنش خاک، دایرهٔ مور را در مختصات $(\sigma - \tau)$ رسم می‌کنیم که می‌توان انتظار داشت یکی از سه حالت زیر اتفاق بیافتد:



در این حالت دایرهٔ مور المان خاک، خط گسیختگی مور- کولمب را لمس نمی‌کند. بنابراین هیچ صفحه‌ای روی المان نداریم که صفحهٔ گسیختگی باشد و خاک در شرایط ایمن است.



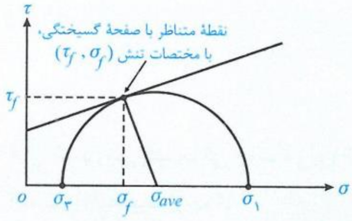
در این حالت دایرهٔ مور المان خاک، خط گسیختگی را در یک نقطه لمس می‌کند که این نقطه روی دایرهٔ مور، متناظر با صفحهٔ گسیختگی روی المان است. پس خاک در آستانهٔ گسیختگی است.



این شکل غیرممکن و بی‌معنا است زیرا خاک پس از لمس خط گسیختگی توسط دایرهٔ مور، گسیخته می‌شود و عملاً دایرهٔ موری بزرگتر از این حالت، تشکیل نمی‌گردد.

در مجموع از بحث فوق می‌توان دو نتیجهٔ مهم زیر را برداشت کرد:

۱ المان خاک پس از مماس شدن دایرهٔ مور بر خط گسیختگی مور کولمب $(\tau_f = \sigma \tan\phi + c)$، گسیخته می‌شود. در این شرایط نقطهٔ تماس دایرهٔ مور با خط مور - کولمب، متناظر با صفحهٔ گسیختگی روی المان است.

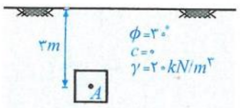


۲ در محل گسیخته شدن المان، عملاً ترکیبی بحرانی از σ و τ ایجاد شده و باعث گسیختگی می‌شود.

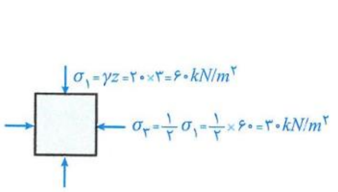
تمرین ۳: در پروفیل خاک شکل مقابل، تنش افقی نصف تنش قائم است.

الف) گسیختگی خاک در المان قرار گرفته در نقطهٔ A را بررسی کنید.

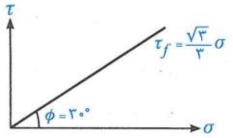
ب) در چه عمقی از سطح خاک، المان در آستانهٔ گسیختگی است؟



پاسخ قبل از شروع حل، تنش‌های اصلی روی المان را مشخص می‌کنیم:

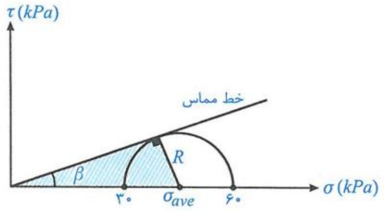


الف) ابتدا با نوشتن معادلهٔ خط مور - کولمب، این خط را به‌صورت زیر ترسیم می‌کنیم:



$$\tau_f = \sigma \tan\phi + c \;\Rightarrow\; \tau_f = \sigma \times \tan ۳۰ + ۰ \;\Rightarrow\; \tau_f = \frac{\sqrt{۳}}{۳}\sigma$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید این خط با توجه به صفر بودن چسبندگی خاک ($c = ۰$) از مبدأ مختصات می‌گذرد. سپس در ادامه، دایرهٔمور تنش‌های المان را رسم کرده و زاویه خط مماس بر این دایره را که از مبدأ می‌گذرد (نسبت به افق) می‌یابیم تا از این طریق معادلهٔ خط مماس به‌دست آید.

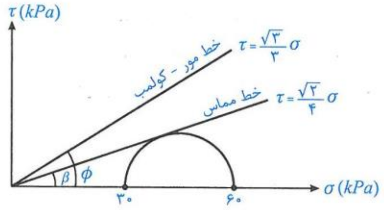


$$\text{مثلث هاشورخورده} \;\Rightarrow\; \sin\beta = \frac{R}{\sigma_{ave}} = \frac{(\frac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲})}{(\frac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲})} = \frac{۶۰ - ۳۰}{۶۰ + ۳۰} = \frac{۱}{۳}$$

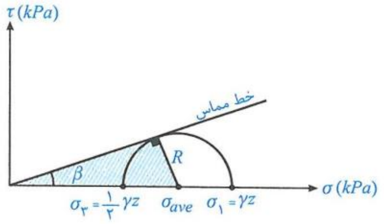
حال اگر بخواهیم معادلهٔ خط مماس را بنویسیم، ابتدا بایستی $\tan\beta$ را به‌صورت زیر محاسبه کنیم:

$$\tan\beta = \frac{\sin\beta}{\cos\beta} = \frac{\sin\beta}{\sqrt{۱ - \sin^۲\beta}} = \frac{\frac{۱}{۳}}{\sqrt{۱ - \frac{۱}{۹}}} = \frac{\sqrt{۲}}{۴} \xrightarrow{\text{خط مماس بر دایره از مبدأ}} \tau = \frac{\sqrt{۲}}{۴}\sigma$$

در نهایت با کمک شکل زیر می‌توان فهمید که دایرهٔ مور مربوط به تنش‌های المان، خط گسیختگی مور- کولمب را لمس نکرده و گسیختگی در المان رخ نمی‌دهد.



ب) برای آنکه المان واقع در عمق z با تنش قائم γz و تنش افقی نصف آن یعنی $\frac{۱}{۲}\gamma z$ در آستانهٔ گسیختگی قرار گیرد باید خط مماس بر دایرهٔ مور، همان خط گسیختگی مور- کولمب باشد و این اتفاق زمانی رخ می دهد که $\beta = \phi$ باشد. حال برای کنترل این موضوع به‌صورت زیر عمل می‌کنیم:



$$\begin{cases} R = \dfrac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲} = \dfrac{\gamma z - \frac{۱}{۲}\gamma z}{۲} = \dfrac{۱}{۴}\gamma z \\ \sigma_{ave} = \dfrac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲} = \dfrac{\gamma z + \frac{۱}{۲}\gamma z}{۲} = \dfrac{۳}{۴}\gamma z \end{cases}$$

$$\text{مثلث هاشورخورده} \;\Rightarrow\; \sin\beta = \frac{R}{\sigma_{ave}} = \frac{\frac{۱}{۴}\gamma_z}{\frac{۳}{۴}\gamma_z} = \frac{۱}{۳}$$

با توجه به اینکه $\sin\phi = \sin ۳۰°$ می‌باشد، پس $\beta < \phi$ بوده و این یعنی خط مماس بر دایره مور در هر عمق دلخواهی همواره پایین‌تر از خط مور- کولمب قرار می‌گیرد و در نتیجه در هیچ عمقی گسیختگی رخ نمی‌دهد.

کمی توضیح بیشتر

حال ممکن است از خود بپرسید که در المان قسمت (الف)، کدام صفحه کمترین ضریب اطمینان در برابر لغزش را دارد؟
برای تعیین صفحه‌ای که کمترین ضریب اطمینان را دارد، کافی است تا از رابطهٔ ضریب اطمینان نسبت به α (زاویه صفحهٔ موردنظر نسبت به افق) مشتق گرفته و آن را مساوی صفر قرار دهیم:

$$\begin{cases} FS = \dfrac{\tau_f}{\tau} = \dfrac{\sigma \tan\phi + c}{\tau} \xrightarrow{c=0} FS = \dfrac{\sigma \tan\phi}{\tau} = \tan\phi\left(\dfrac{\sigma}{\tau}\right) \\ \sigma = \sigma_{ave} + R\cos 2\alpha = \left(\dfrac{60+30}{2}\right) + \left(\dfrac{60-30}{2}\right)\cos 2\alpha = 45 + 15\cos 2\alpha \\ \tau = R\sin 2\alpha = \left(\dfrac{60-30}{2}\right)\sin 2\alpha = 15\sin 2\alpha \end{cases}$$

$$\frac{d(FS)}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\alpha}\left(\frac{\sigma}{\tau}\right) = 0 \Rightarrow \frac{d}{d\alpha}\left[\frac{45+15\cos 2\alpha}{15\sin 2\alpha}\right] = 0$$

مشتق‌گیری نسبت به α:
$$\frac{\underbrace{(-30\sin 2\alpha)}_{\text{مشتق صورت}}\underbrace{(15\sin 2\alpha)}_{\text{مخرج}} - \underbrace{(30\cos 2\alpha)}_{\text{مشتق مخرج}}\underbrace{(45+15\cos 2\alpha)}_{\text{صورت}}}{(15\sin 2\alpha)^2} = 0$$

$$\xrightarrow{\text{صورت کسر}=0} -\sin^2 2\alpha - 3\cos 2\alpha - \cos^2 2\alpha = 0 \Rightarrow -3\cos 2\alpha = \underbrace{\sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha}_{1} \Rightarrow \cos 2\alpha = -\frac{1}{3}$$

$$\xrightarrow{\text{ماشین حساب}} \alpha \simeq 55^\circ$$

تمرین ۴: براساس معیار مور-کولمب گسیختگی برشی (*Shear failure*) زمانی در یک توده خاک رخ می‌دهد که: (سراسری - ۸۰ و ۸۱)

۱) تنش قائم به یک مقدار حداکثر و تنش برشی در یک صفحه به میزان بحرانی برسد.
۲) ترکیب تنش قائم و تنش برشی در یک صفحه به مقدار حداکثر برسند.
۳) تنش برشی، در یک صفحه به یک مقدار حداکثر و تنش قائم به یک مقدار حداکثر برسد.
۴) ترکیب تنش قائم و تنش برشی در یک صفحه به میزان بحرانی برسند.

● حل: با توجه به توضیحات متن درس، گزینهٔ (۴) درست است.

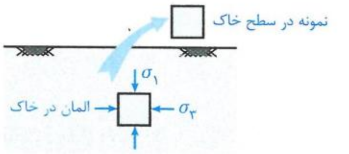
قسمت دوم (تحلیل روابط گسیختگی المان خاک)

در قسمت قبل دیدیم که وقتی خاک تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، ممکن است در آن گسیختگی رخ دهد و یا اصلاً گسیختگی اتفاق نیفتد. به هر حال ما به‌عنوان یک مهندس عمران باید رفتار خاک را به لحاظ مقاومتی، قبل از ساخت سازه بر روی آن بشناسیم. به همین دلیل در آزمایشگاه با ایجاد شرایطی که بیشترین شباهت را با شرایط طبیعی المان در خاک دارد، خاک را گسیخته می‌کنیم و با نتایج حاصل از این گسیختگی، خاک را ارزیابی می‌نماییم. این ارزیابی به ما کمک می‌کند که فونداسیون سازه را به‌گونه‌ای طراحی کنیم تا خاک زیر سازه تحمل بارهای وارده را داشته باشد.

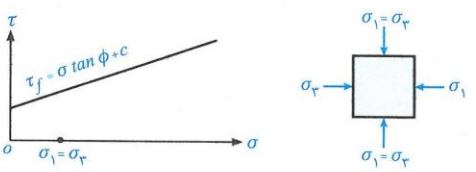
در این قسمت می‌خواهیم روش مدل‌سازی شرایط خرابی برای یک المان خاک را به شما نشان داده و روابط تنش‌ها، به‌خصوص تنش‌های اصلی را در لحظهٔ گسیختگی به‌دست آوریم.

B-۱- مدل‌سازی شرایط خرابی برای یک المان

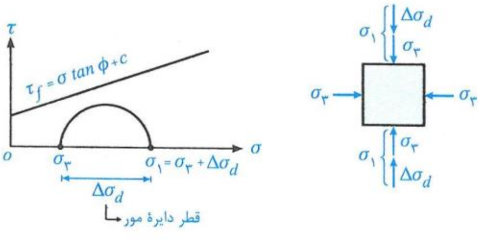
المان کوچکی از خاک را در نظر بگیرید که مطابق شکل زیر از عمق به سطح خاک آورده شده است. با خارج کردن المان از خاک، تنش‌های وارد بر آن ناچیز و تقریباً برابر صفر است (زیرا ضخامت نمونه بسیار کم است). حال می‌خواهیم با انجام مراحل زیر بر روی این نمونه، ضمن ایجاد بیشترین شباهت با حالت طبیعی، آن را گسیخته کنیم:



مرحلهٔ اول: وقتی نمونهٔ خاک به سطح زمین آورده می‌شود، حمایت خاک‌های اطراف خود را از دست داده و ضعیف می‌شود. بنابراین برای جبران این ضعف باید **فشار همه جانبهٔ σ_3** را که برابر فشار جانبی خاک در طبیعت است، به نمونه وارد کنیم تا محکم شود و تا حدی به شرایط طبیعی اولیهٔ خود باز گردد. در این حالت دایرهٔ مور به‌صورت یک نقطه است (زیرا $\sigma_1 = \sigma_3$ بوده و شعاع دایرهٔ مور یعنی $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ برابر صفر است).



مرحلهٔ دوم: در این مرحله **تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$** را در راستای قائم (عملاً هم راستا با نیروی وزن سازه) به المان وارد می‌کنیم تا با ثابت ماندن σ_3 و افزایش σ_1، قطر دایرهٔ مور رفته رفته افزایش یافته و دایرهٔ مور بزرگ شود و خود را به خط مور- کولمب نزدیک کند.

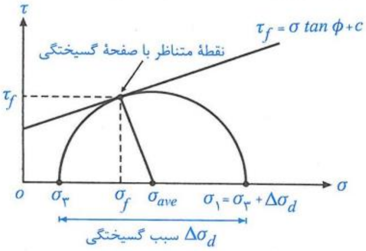


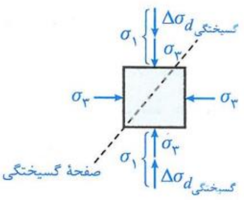
زیر شاخه‌های قسمت دوم

B-۱- مدل‌سازی شرایط خرابی برای یک المان

B-۲- روابط تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی

مرحلهٔ سوم: این مرحله که به نوعی پایان مرحلهٔ دوم به حساب می‌آید، لحظه‌ای را نشان می‌دهد که افزایش تدریجی $\Delta\sigma_d$ سرانجام باعث مماس شدن دایرهٔ مور بر خط مور- کولمب شده است. به‌عبارت دیگر مرحلهٔ سوم همان **لحظهٔ گسیختگی** یا **آستانهٔ گسیختگی** است.



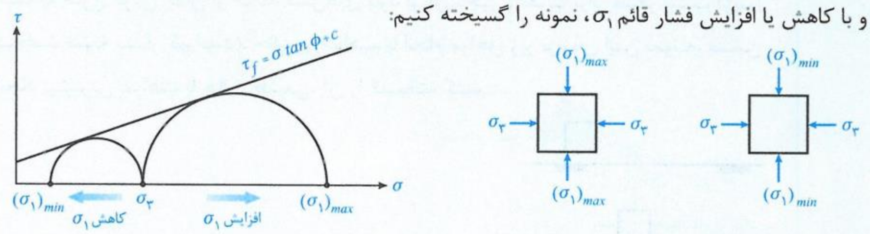


بررسی یک موضوع مهم

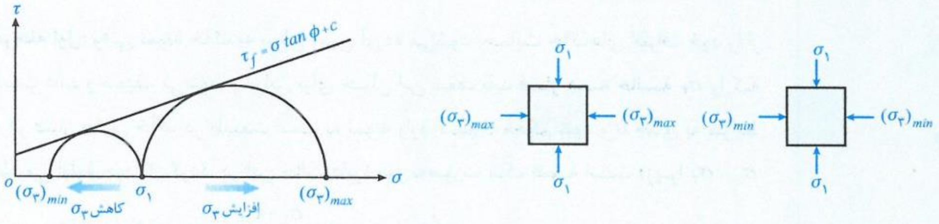
ما در این قسمت با مکانیزم گسیختگی یک المان آشنا شدیم و دیدیم که چگونه افزایش تنش قائم می‌تواند باعث گسیختگی المان شود. حال این سؤال مطرح است که آیا گسیختگی یک نمونه (المان به سطح خاک آمده) تنها از طریق افزایش تنش قائم ممکن است، یا روش‌های دیگری نیز برای ایجاد شرایط گسیختگی وجود دارد؟

در جواب باید گفت، اصولاً هر عاملی که باعث افزایش قطر دایرهٔ مور و مماس شدن آن بر خط گسیختگی مور- کولمب شود، باعث گسیختگی نمونه خواهد شد. موارد زیر حالت‌های ممکن برای گسیختگی یک نمونه را نشان می‌دهند:

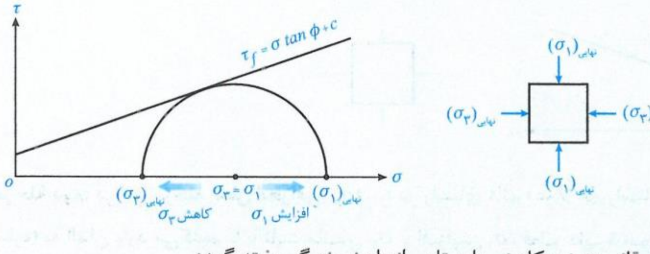
۱) فشار افقی σ_3 ثابت باشد و با کاهش یا افزایش فشار قائم σ_1، نمونه را گسیخته کنیم:



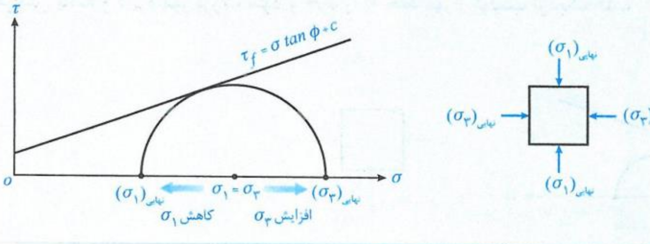
۲) فشا قائم σ_1 ثابت باشد و با کاهش یا افزایش فشار افقی σ_3، نمونه را گسیخته کنیم:



۳) فشار افقی σ_3 را کاهش دهیم و هم‌زمان با آن، فشار قائم σ_1 نیز افزایش یابد تا نمونه گسیخته گردد:



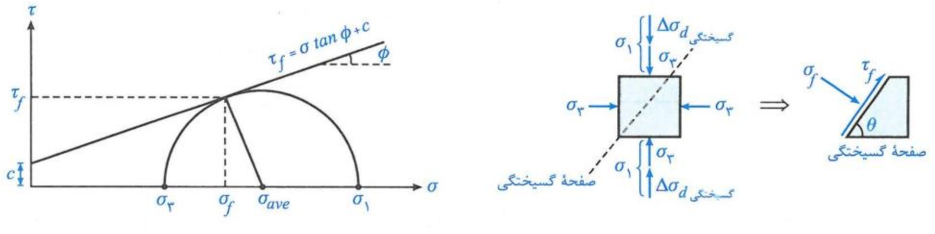
۴) فشار افقی σ_3 را افزایش دهیم و هم‌زمان با آن، فشار قائم σ_1 نیز کاهش یابد تا سرانجام نمونه گسیخته گردد:



حال در ادامه به تحلیل روابط تنش‌ها در یک المان در آستانهٔ گسیختگی می‌پردازیم.

B-۲- روابط تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی

یک المان را که در آستانهٔ گسیختگی است تصور کنید. می‌دانیم در این حالت دایرهٔمور بر خط گسیختگی مور- کولمب مماس شده و وضعیتی به‌صورت شکل زیر ایجاد می‌گردد:

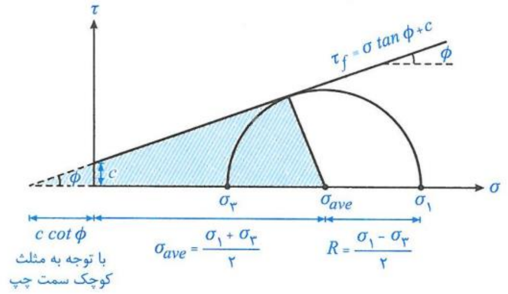


همچنین در قسمت قبل دیدیم که در صفحهٔ گسیختگی، طبق رابطهٔ مور- کولمب ارتباط زیر بین τ و σ برقرار است:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c$$

حال این سؤال مطرح است که **اولاً در لحظهٔ گسیختگی چه رابطه‌ای بین تنش‌های اصلی σ_1 و σ_3 برقرار است و ثانیاً امتداد صفحهٔ گسیختگی چه موقعیتی دارد یا به زبان ساده‌تر θ چقدر است؟**

- **پاسخ به سؤال اول:** برای پاسخ به این سؤال بیایید دوباره دایرهٔ مور و خط مور- کولمب را در لحظهٔ گسیختگی ترسیم کنیم، اما این‌بار اندازه‌ها را دقیق‌تر روی شکل نشان می‌دهیم تا راحت‌تر بتوانیم از روابط هندسی و مثلثاتی استفاده کرده و به جواب برسیم:



مقدار $\sin\phi$ در مثلث بزرگ هاشورخورده در شکل بالا برابر است با:

$$\sin\phi = \frac{\text{ضلع مقابل}}{\text{وتر}} = \frac{R}{c\cot\phi + \sigma_{ave}} = \frac{(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2})}{c\cot\phi + (\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2})} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c\cot\phi + (\sigma_1 + \sigma_3)}$$

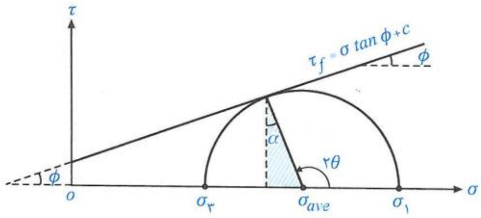
در ادامه با طرفین وسطین کردن رابطه بالا و مرتب کردن آن، ارتباط بین σ_1 و σ_3 را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$2c\cos\phi + \sigma_1 \sin\phi + \sigma_3 \sin\phi = \sigma_1 - \sigma_3 \Rightarrow \sigma_1(1 - \sin\phi) = \sigma_3(1 + \sin\phi) + 2c\cos\phi$$

$$\Rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 \underbrace{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}}_{\tan^2(45 + \frac{\phi}{2})} + 2c \overbrace{\frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi}}^{\tan(45 + \frac{\phi}{2})} \Rightarrow \boxed{\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45 + \frac{\phi}{2})}$$

(از مثلثات می‌دانیم: $\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$ و $\frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi} = \tan(45 + \frac{\phi}{2})$)

رابطهٔ بالا، **رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی** نام دارد و به جرأت می‌توان گفت، اکثر مسئله‌های مطرح شده در این فصل با این رابطه حل می‌شوند و باید آن را به‌خاطر بسپارید.



● **پاسخ به سؤال دوم:** برای یافتن θ توجه داریم که برای رسیدن از صفحهٔ σ_1 (امتداد قائم) به صفحهٔ گسیختگی، باید در المان به اندازهٔ θ بچرخیم که این چرخش روی دایرهٔ مور برابر 2θ است.

در ادامه با توجه به آنچه از درس هندسه می‌دانید، خواهیم داشت:

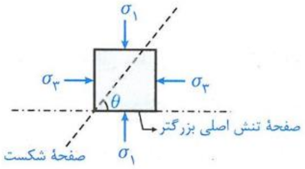
زاویه 2θ، زاویهٔ خارجی مثلث هاشورخورده است و برابر مجموع زوایای داخلی غیر مجاورش از این مثلث می‌باشد: $2\theta = 90 + \alpha$

از طرفی زوایای α و ϕ با هم برابرند، زیرا اضلاع آنها دو به دو بر هم عمود است، بنابراین می‌نویسیم:

$$2\theta = 90 + \phi \Rightarrow \theta = 45 + \frac{\phi}{2}$$

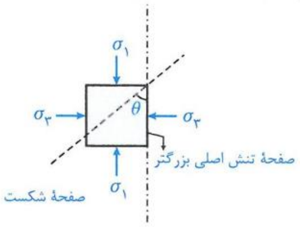
به‌عنوان یک موضوع بسیار مهم توجه کنید که θ **زاویهٔ صفحهٔ گسیختگی (صفحهٔ شکست) با صفحهٔ تنش اصلی بزرگتر است**، بنابراین می‌توان گفت:

الف) اگر $\sigma_1 > \sigma_3$ باشد:



زاویهٔ صفحهٔ شکست با امتداد افق $= \theta$

ب) اگر $\sigma_3 > \sigma_1$ باشد:



زاویهٔ صفحهٔ شکست با امتداد قائم $= \theta$

تذکر: اگر مقدار θ را در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی لحاظ کنیم، در آن‌صورت این رابطه به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \underbrace{(45 + \frac{\phi}{2})}_{\theta} + 2c \tan \underbrace{(45 + \frac{\phi}{2})}_{\theta} \Rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\theta + 2c \tan\theta$$

در ادامه با بررسی چند سؤال، روابط تنش‌ها در این قسمت را تکمیل می‌کنیم:

بررسی چند سؤال

سؤال ۱: اگر بخواهیم σ_3 (تنش اصلی کوچکتر) را برحسب σ_1 (تنش اصلی بزرگ‌تر) بنویسیم، در آن‌صورت رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی به چه شکلی در می‌آید؟

● **پاسخ:** برای پاسخ به این سؤال، دوباره به روند به‌دست آمدن رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی توجه کنید. ما در اواسط این روند به جملهٔ زیر رسیدیم:

$$\sigma_1(1 - \sin\phi) = \sigma_3(1 + \sin\phi) + 2c\cos\phi$$

حال در ادامه این‌بار می‌نویسیم:

$$\sigma_3(1 + \sin\phi) = \sigma_1(1 - \sin\phi) - 2c\cos\phi$$

$$\Rightarrow \sigma_3 = \sigma_1 \underbrace{\frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi}}_{\tan^2(45 - \frac{\phi}{2})} - 2c \underbrace{\frac{\cos\phi}{1 + \sin\phi}}_{\tan(45 - \frac{\phi}{2})} \Rightarrow \sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) - 2c \tan(45 - \frac{\phi}{2})$$

سؤال ۲: در لحظهٔ گسیختگی خاک چه رابطه‌ای بین تنش‌های اصلی ($\sigma_۳$ ، $\sigma_۱$) و تنش‌های صفحهٔ شکست (σ_f ، τ_f) برقرار است؟

● پاسخ: صفحهٔ شکست، صفحه‌ای است که در آن $\alpha = \theta$ می‌باشد. بنابراین طبق مطالب گفته شدهٔ قبلی (در پیش فصل) می‌توان با محاسبهٔ σ_{ave} و R و سپس ترسیم دایرهٔ مور دو رابطهٔ زیر را نوشت:

$$\sigma_f = \sigma_{ave} + R\cos ۲\theta = (\frac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲}) + (\frac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲})\cos ۲\theta$$

$$\tau_f = R\sin ۲\theta = (\frac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲})\sin ۲\theta$$

سؤال ۳: همانطورکه در بخش قبلی این قسمت دیدید، ممکن است در لحظهٔ گسیختگی خاک، تنش افقی $\sigma_۳$ بزرگ‌تر از تنش قائم $\sigma_۱$ باشد. در این شرایط رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی به چه صورت خواهد بود؟

● پاسخ: در این شرایط جای $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی عوض شده و رابطه به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_۳ > \sigma_۱ \Rightarrow \sigma_۳ = \sigma_۱ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) + ۲c\tan(۴۵ + \frac{\phi}{۲})$$

توجه کنید که در این حالت، طبق آنچه قبلاً نیز دیدید، θ زاویهٔ صفحه شکست با امتداد قائم است و برای به‌دست آوردن زاویه صفحهٔ شکست با امتداد افق خواهیم داشت:

$$\text{زاویه صفحهٔ شکست با امتداد افق} = ۹۰ - \theta$$

نتیجه: رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی در هر شرایطی به‌صورت زیر برقرار است:

$$\sigma_{\text{بزرگتر}} = \sigma_{\text{کوچکتر}} \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) + ۲c\tan(۴۵ + \frac{\phi}{۲})$$

و همواره θ، زاویهٔ صفحهٔ شکست با صفحهٔ دارای تنش اصلی بزرگتر است.

در ادامه با حل چند تمرین این بحث بسیار مهم را بهتر یاد می‌گیریم. در حل مسائل استفاده از رابطهٔ اصلی که در نتیجهٔ فوق بیان کردیم و دایرهٔ مور، حل را بسیار ساده می‌کند.

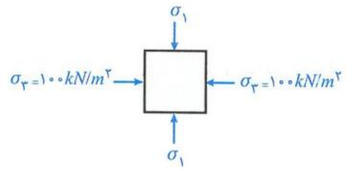
تمرین ۵: یک نمونه خاک با زاویهٔ اصطکاک داخلی $\phi = ۳۰^\circ$ و چسبندگی $c = ۱۰\sqrt{۳}\ kPa$ در آزمایشگاه تحت بارگذاری قرار گرفته و با افزایش تنش قائم به گسیختگی می‌رسد. اگر وضعیت تنش‌های اصلی وارد بر نمونه در لحظهٔ گسیختگی به‌صورت زیر باشد، در آن‌صورت در لحظهٔ گسیختگی:

الف) مقدار تنش اصلی $\sigma_۱$ چند $kN/m^۲$ می‌باشد؟

ب) زاویهٔ صفحهٔ شکست با امتداد افق چقدر است؟

ج) ضریب اطمینان گسیختگی برشی در صفحهٔ شکست چقدر است؟

د) مقدار ضریب اطمینان در صفحهٔ تنش برشی ماکزیمم را بیابید.



● حل:

الف) چون گسیختگی نمونه با افزایش تنش قائم اتفاق افتاده است، بنابراین $\sigma_۱ > \sigma_۳$ بوده و خواهیم داشت:

$$\sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) + ۲c\tan(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) = ۱۰۰ \times \tan^۲(۴۵ + \frac{۳۰}{۲}) + ۲ \times ۱۰\sqrt{۳} \times \tan(۴۵ + \frac{۳۰}{۲})$$

$$= ۱۰۰ \times ۳ + ۲۰\sqrt{۳} \times \sqrt{۳} = ۳۶۰\ kN/m^۲$$

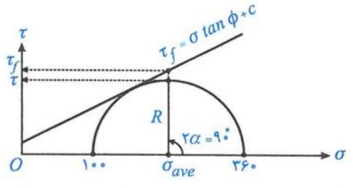
ب) θ زاویهٔ صفحهٔ شکست با صفحهٔ تنش اصلی بزرگتر می‌باشد که چون $\sigma_۱ > \sigma_۳$ است، θ زاویهٔ صفحهٔ شکست با امتداد افق خواهد بود، بنابراین می‌نویسیم:

$$\text{زاویه صفحهٔ شکست با امتداد افق} = \theta = ۴۵ + \frac{\phi}{۲} = ۴۵ + \frac{۳۰}{۲} = ۶۰^\circ$$

ج) در لحظهٔ گسیختگی، در صفحهٔ شکست تنش برشی وارد بر صفحه (τ) در واقع با تنش برشی مقاوم (τ_f) برابر بوده و ضریب اطمینان گسیختگی برشی برابر $FS = ۱$ است.

د) سؤال بسیار جالبی است. برای تعیین ضریب اطمینان در صفحهٔ با تنش برشی ماکزیمم، مطابق با گام‌بندی گفته شده در قسمت اول عمل می‌کنیم:

گام اول: ابتدا با ترسیم دایرهٔ مور، مقادیر σ و τ را در صفحهٔ تنش برشی ماکزیمم $(\alpha = ۴۵^\circ)$ می‌یابیم:



$$\sigma = \sigma_{ave} = \frac{۳۶۰+۱۰۰}{۲} = ۲۳۰\ kN/m^۲$$

$$\tau = \tau_{max} = R = \frac{۳۶۰-۱۰۰}{۲} = ۱۳۰\ kN/m^۲$$

گام دوم: مقاومت برشی خاک در صفحهٔ $\alpha = ۴۵^\circ$ را به‌دست می‌آوریم:

$$\tau_f = \sigma \tan\phi + c = ۲۳۰ \times \tan ۳۰ + ۱۰\sqrt{۳} = \frac{۲۶۰\sqrt{۳}}{۳} \simeq ۱۵۰\ kN/m^۲$$

گام سوم: ضریب اطمینان را از حاصل تقسیم τ_f بر τ محاسبه می‌کنیم:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{۱۵۰}{۱۳۰} = ۱/۱۵$$

تمرین ۶: یک نمونه خاک ماسه‌ای در آزمایشگاه تحت فشار همه جانبه $\sigma_۳ = ۵۰\ kN/m^۲$ قرار گرفته و سپس با افزایش تنش قائم گسیخته می‌شود. مقادیر تنش‌های نرمال و برشی در صفحهٔ شکست را به‌دست آورید. $(\phi = ۳۰^\circ)$

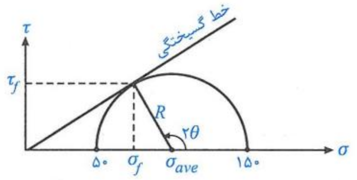
حل: ابتدا زاویه θ و سپس مقدار $\sigma_۱$ را می‌یابیم:

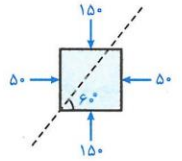
$$\theta = ۴۵ + \frac{\phi}{۲} = ۴۵ + \frac{۳۰}{۲} = ۶۰^\circ$$

$$\sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲\theta + ۲c \tan\theta = ۵۰ \times \tan^۲ ۶۰ + ۰ = ۱۵۰\ kN/m^۲$$

(در خاک ماسه‌ای $c = ۰$ است)

در ادامه با ترسیم دایرهٔ مور، مقادیر σ_f و τ_f را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:





$$\sigma_f = \sigma_{ave} - R\cos(۱۸۰ - ۲\theta) = \left(\frac{۱۵۰+۵۰}{۲}\right) - \left(\frac{۱۵۰-۵۰}{۲}\right) \times \cos(۱۸۰ - ۲ \times ۶۰) = ۱۰۰ - ۵۰ \times \frac{۱}{۲} = ۷۵\ kN/m^۲$$

$$\tau_f = R\sin(۱۸۰ - ۲\theta) = \left(\frac{۱۵۰-۵۰}{۲}\right) \times \sin(۱۸۰ - ۲ \times ۶۰) = ۵۰ \times \frac{\sqrt{۳}}{۲} = ۲۵\sqrt{۳}\ kN/m^۲$$

تذکر: البته می‌توانستیم در حل این مسئله بدون رسم دایرهٔ مور نیز مستقیماً از روابط $\sigma_f = \sigma_{ave} + R\cos ۲\theta$ و $\tau_f = R\sin ۲\theta$ که بارها در این فصل مشاهده کردید، استفاده کنیم.

تمرین ۷: یک نمونه خاک ماسه‌ای با زاویهٔ اصطکاک داخلی $\phi = ۳۰^\circ$، در اثر افزایش تنش افقی به گسیختگی می‌رسد. اگر مقدار تنش برشی در صفحهٔ شکست این خاک برابر $۵۰\sqrt{۳}\ kN/m^۲$ باشد، در آن‌صورت مقادیر تنش‌های اصلی $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ که باعث گسیختگی شده‌اند، چقدر است؟

حل: در صفحهٔ شکست با استفاده از رابطهٔ مور- کولمب مقدار تنش نرمال را می‌یابیم:

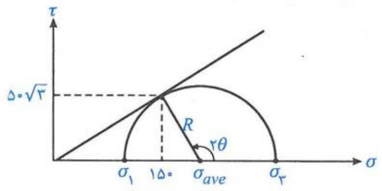
$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c \Rightarrow ۵۰\sqrt{۳} = \sigma_f \times \tan ۳۰ + ۰ \Rightarrow \sigma_f = ۱۵۰\ kN/m^۲$$

(در خاک ماسه‌ای $c = ۰$ است)

همچنین مقدار θ (زاویهٔ با صفحهٔ اصلی بزرگتر) نیز برابر است با:

$$\theta = ۴۵ + \frac{\phi}{۲} = ۴۵ + \frac{۳۰}{۲} = ۶۰^\circ$$

حال با ترسیم دایرهٔ مور در این حالت خواهیم داشت:



$$\begin{cases} 150 = \sigma_{ave} - R\cos(180 - 2\theta) = \sigma_{ave} - R\,\underbrace{\cos(180^\circ - 2\times 60^\circ)}_{\frac{1}{2}} = \sigma_{ave} - \frac{1}{2}R \\ 50\sqrt{3} = R\sin(180 - 2\theta) = R\,\underbrace{\sin(180^\circ - 2\times 60^\circ)}_{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{R\sqrt{3}}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 150 = \sigma_{ave} - \frac{1}{2}R \\ 50\sqrt{3} = \frac{\sqrt{3}}{2}R \end{cases} \xrightarrow{\text{حل دستگاه}} R = 100\,kN/m^2 \quad , \quad \sigma_{ave} = 200\,kN/m^2$$

و در ادامه می‌نویسیم:

$$\begin{cases} R = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} = 100 \\ \sigma_{ave} = \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} = 200 \end{cases} \xrightarrow{\text{حل دستگاه}} \sigma_1 = 100\,kN/m^2 \quad , \quad \sigma_3 = 300\,kN/m^2$$

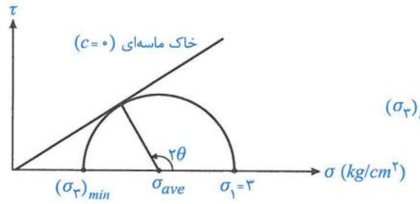
تمرین ۸: بر روی یک نمونه از خاک ماسه‌ای با زاویهٔ اصطکاک 30°، فشار قائم ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع وارد می‌شود.

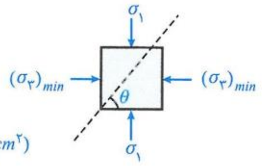
الف) حداقل فشار افقی قابل اعمال بر این نمونه (برحسب kg/cm^2) و نیز زاویهٔ صفحهٔ شکست با افق در این حالت (برحسب درجه) را به‌دست آورید.

ب) حداکثر فشار افقی قابل اعمال بر این نمونه و نیز زاویه صفحهٔ شکست با افق در این حالت چقدر است؟ (سراسری - ۸۸)

● حل: در این تمرین در هر قسمت ابتدا دایره مور و المان تنش‌ها را ترسیم می‌کنیم تا درک بهتری نسبت به مسئله ایجاد شود:

الف) چون حداقل فشار افقی خواسته شده است، بنابراین با کم کردن σ_3، در نهایت دایرهٔ مور بر خط گسیختگی مور- کولمب مماس شده و خواهیم داشت:



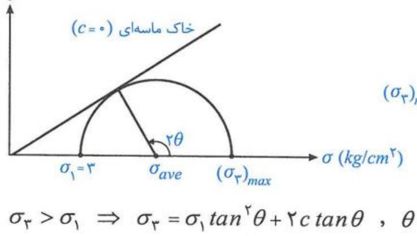


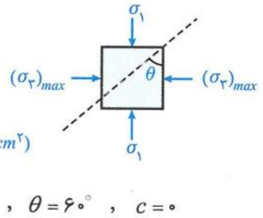
$\sigma_1 > \sigma_3 \Rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\theta + 2c\tan\theta \ , \ \theta = 45 + \frac{\phi}{2} = 45 + \frac{30}{2} = 60^\circ \ , \ c = 0$ (ماسه)

$\Rightarrow 3 = \sigma_3 \times \tan^2 60 + 0 \Rightarrow \sigma_3 = 1\,kg/cm^2$

$\theta = 60^\circ =$ زاویهٔ صفحهٔ شکست با افق

ب) در این حالت چون حداکثر فشار افقی مورد نظر است، بنابراین با افزایش تنش σ_3 در نهایت دایرهٔ مور بر خط گسیختگی مماس شده و چون در لحظهٔ گسیختگی σ_3 از σ_1 بزرگتر است، خواهیم داشت:





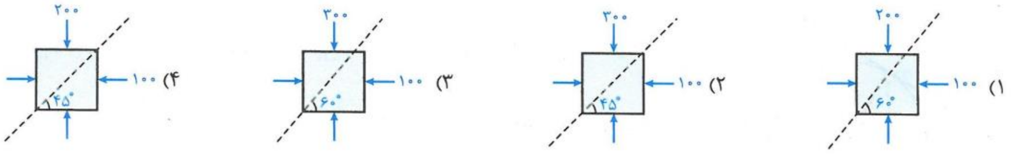
$\sigma_3 > \sigma_1 \Rightarrow \sigma_3 = \sigma_1 \tan^2\theta + 2c\tan\theta \ , \ \theta = 60^\circ \ , \ c = 0$

$\sigma_3 = 3 \times \tan^2 60 + 0 = 9\,kg/cm^2$

$90 - \theta = 90 - 60 = 30^\circ =$ زاویه صفحهٔ شکست با امتداد افق

تذکر: از این تمرین بسیار مهم نتیجه می‌شود که محدودهٔ قابل قبول تنش‌های افقی وارد بر این نمونه بین ۱ تا ۹ kg/cm^2 است، یعنی در داخل این محدوده خاک گسیخته نمی‌شود ولی با رسیدن σ_3 به هر کدام از این دو مقدار، خاک گسیخته خواهد شد.

تمرین ۹: در کدام‌یک از صفحات نشان داده شده در گزینه‌ها، المان خاک در آستانهٔ گسیختگی قرار دارد؟ (مشخصات خاک $c=0$ و $\phi=30°$)



پاسخ: ابتدا با توجه به مقدار ϕ، زاویهٔ صفحهٔ شکست با صفحهٔ تنش اصلی حداکثر را می‌یابیم:

$$\theta = 45 + \frac{\phi}{2} = 45 + \frac{30}{2} = 60°$$

در این تست چون $\sigma_1 > \sigma_3$ است، بنابراین $\theta = 60°$ زاویه صفحهٔ شکست با امتداد افق نیز می‌باشد. از این‌رو گزینه‌های (۲) و (۴) حذف شده و جواب این تست نیستند. حال بررسی کنیم که رابطهٔ گسیختگی مربوط به تنش‌های اصلی در تنش‌های کدام‌یک از المان‌های (۱) و (۳) صدق می‌کند.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\theta + 2c\tan\theta = \sigma_3 \times \tan^2 60 + 0 = 3\sigma_3$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید در گزینهٔ اول، $\sigma_1 = 2\sigma_3$ است و این المان در آستانهٔ گسیختگی قرار ندارد، ولی در گزینهٔ سوم، $\sigma_1 = 3\sigma_3$ بوده و این المان جواب سؤال است.

نتیجه مهم

برای گسیختگی خاک در یک صفحهٔ مشخص دو شرط لازم است:

۱- صفحهٔ موردنظر صفحهٔ گسیختگی (صفحهٔ θ) باشد.

۲- بین تنش‌های اصلی نمونه یا المان، رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی برقرار باشد.

قسمت سوم/ نقش آب در مقاومت برشی خاک

برای شروع این بحث بیایید مطالب خوانده شده در فصل های گذشته را به‌صورت گذرا مرور کنیم و نقش آب در مکانیک خاک را به‌خاطر آوریم. البته ما نیز در این مرور کردن به شما کمک کرده و توصیه می‌کنیم تا موارد زیر را مورد توجه قرار دهید:

۱) در دو فصل اول کتاب که به مبانی مکانیک خاک پرداخته شد، نقش آب در چسبندگی و روان شدن خاک رس را بررسی کردیم و در فصل سوم هم دیدیم که آب نقش مهمی در رسیدن خاک به تراکم حداکثر دارد.

۲) در فصل‌های مربوط به حرکت آب در خاک و بحث تنش مؤثر، دیدیم که حضور و تراوش آب در خاک، چگونه تنش‌های مؤثر و کل را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۳) در بحث مربوط به نشست خاک در فصل هفتم، تأثیر آب بر تنش مؤثر و محاسبهٔ نشست تحکیم را بررسی کردیم و دیدیم که جابه‌جایی سطح آب، چگونه می‌تواند باعث نشست یا تورم در خاک گردد.

حال این سؤال مطرح می‌شود که آیا آب بر روی مقاومت برشی خاک نیز تأثیر می‌گذارد و اگر تأثیرگذار است، در مراحل مختلف اعمال بار، این تأثیر در چه لحظه‌ای برای ما مهم است؟

در پاسخ باید گفت:

حضور آب بر روی مقاومت برشی خاک تأثیرگذار است و از آنجائیکه در بحث مقاومت برشی به‌طور کلی به دنبال تحلیل لحظهٔ گسیختگی هستیم، بنابراین نقش آب نیز در این لحظه برای ما مهم است.

در ادامه با این مقدمه‌ای که گفته شد، می‌خواهیم به بررسی نقش آب در مقاومت برشی خاک (به‌خصوص در لحظهٔ گسیختگی) بپردازیم:

C-۱- مفهوم حاکمیت تنش مؤثر و تنش کل

مفهوم حاکمیت تنش مؤثر و تنش کل یکی از مباحث بسیار مهم در مقاومت برشی و مکانیک خاک است که برای شروع این بحث، می‌خواهیم مجدداً از **مدل استوانه و فنر** که با مبانی آن در فصل پنجم آشنا شدید، استفاده کنیم. برای این منظور در شکل‌های نشان داده شده دو مدل (۱) و (۲) را در نظر بگیرید که در یکی (مدل اول) آب به واسطهٔ حفرهٔ موجود روی دریچه، می‌تواند از مجموعه خارج شود و در دیگری (مدل دوم) با توجه به اینکه حفره‌ای نداریم، آبی نیز خارج نمی‌شود. همانطورکه ملاحظه می‌کنید هر دو مدل را تحت بارگذاری قرار داده‌ایم و نیروی F را به‌تدریج زیاد می‌کنیم تا فنرها در نهایت خراب شوند.

مدل (۱):

مدل (۲):

زیر شاخه‌های قسمت سوم

C-۱- مفهوم حاکمیت تنش مؤثر و تنش کل

C-۲- بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک در حضور آب

با توجه به شکل‌های صفحهٔ قبل، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

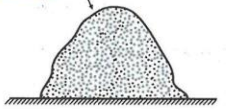
۱) در هر دو حالت (مدل ۱ و ۲)، هدف آن است که با اعمال نیروی F، فنر خراب شود.

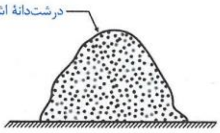
۲) در حالت اول یعنی مدل (۱)، آب اجازه دارد از مجموعه خارج شود، بنابراین در تحمل نیروی F به فنر کمک نمی‌کند. در این شرایط در لحظهٔ خراب شدن فنر، همهٔ نیروی F به فنر می‌رسد و هیچگونه اضافه فشاری (ΔP) در آب ایجاد نمی‌شود.

۳) در حالت دوم یعنی مدل (۲)، آب نمی‌تواند از مجموعه خارج شود، بنابراین به هنگام اعمال نیروی F در کنار فنر بوده و به علت تراکم‌ناپذیری، خود در تحمل بار وارده مشارکت می‌کند. در این شرایط برای خراب شدن فنر، لازم است استوانه هم تغییر شکل دهد و در لحظهٔ خراب شدن فنر، شاهد تقسیم نیروی F بین همهٔ اجزا مجموعه هستیم. این موضوع یعنی دیگر اضافه فشار آب (ΔP) صفر نیست.

۴) علت اصلی تفاوت رفتار مدل‌های (۱) و (۲) به‌هنگام اعمال نیروی F، شرایط خروج آب از مجموعه است.

در ادامهٔ بحث می‌خواهیم موضوع فوق را به مکانیک خاک تعمیم دهیم و نظیر این شرایط را در خاک ببینیم. برای این منظور دو خاکریز اشباع از خاک‌های ریزدانه (با نفوذپذیری بسیار کم) و درشت‌دانه (با نفوذپذیری بسیار بالا) را در نظر بگیرید که مدت زیادی از اجرای آنها گذشته است و تحت اثر وزن خود تحکیم پیدا کرده‌اند. (البته خاکریز درشت‌دانه خیلی سریع تحکیم می‌یابد!)





حال فرض کنید که دو خاکریز فوق تحت اثر نیروی زلزله قرار گرفته‌اند و می‌خواهیم تفاوت رفتار مقاومتی این دو خاکریز را بررسی کنیم:

خاکریز درشت‌دانهٔ اشباع

خاکریز درشت‌دانه به علت نفوذپذیری بسیار بالای خاک، می‌تواند در مدت زمان کوتاه وقوع زلزله، آب را از خود خارج کرده و اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در خود را تخلیه کند. بنابراین اگر خاک تحت اثر این بارگذاریِ سریع گسیخته شود، در لحظهٔ گسیختگی، Δu برابر صفر بوده و عملاً یک **شرایط زهکشی شده** داریم. در این حالت که مشابه با وضعیت مدل (۱) می‌باشد، همهٔ نیروی زلزله به دانه‌های جامد خاک می‌رسد و فقط دانه‌های جامد هستند که در مقاومت خاک نقش دارند. پس در لحظهٔ گسیختگی نیز شاهد افزایش تنش مؤثر در خاک خواهیم بود که اصطلاحاً می گوییم **تنش مؤثر حاکم شده است.**

خاکریز ریزدانهٔ اشباع

خاکریز ریزدانه به علت نفوذپذیری بسیار پایین خاک، نمی‌تواند در مدت زمان کوتاه وقوع زلزله آب را از خود خارج کرده و اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در خود را تخلیه کند. بنابراین اگر خاک تحت اثر این بارگذاریِ سریع گسیخته شود، در لحظهٔ گسیختگی Δu مخالف صفر بوده و **یک شرایط زهکشی نشده** داریم. در این حالت که مشابه با وضعیت مدل (۲) می‌باشد، نیروی زلزله بین آب و دانه‌های جامد تقسیم می‌شود و هر دو آنها در مقاومت خاک نقش دارند. پس در لحظهٔ گسیختگی نیز شاهد افزایش تنش کل در خاک خواهیم بود که اصطلاحاً می‌گوییم **تنش کل حاکم شده است.**

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در یک جمع‌بندی می‌توان نتیجهٔ بحث فوق را در دو حالت زیر خلاصه کرد:

حاکمیت تنش مؤثر: همهٔ بار در لحظهٔ گسیختگی خاک به دانه‌های جامد می‌رسد، $\Delta u = 0$ است و خاک در شرایط زهکشی شده قرار می‌گیرد.

حاکمیت تنش کل: بار وارده در لحظهٔ گسیختگی به کل تودهٔ خاک می‌رسد، $\Delta u \neq 0$ است و خاک در شرایط زهکشی نشده قرار می‌گیرد.

تمرین ۱۰: **در کدام‌یک از موارد زیر، در لحظهٔ گسیختگی، حاکمیت تنش کل برقرار است؟**

۱) یک خاکریز از ماسه درشت‌دانهٔ اشباع که به سرعت اجرا می‌شود و بلافاصله پس از ساخت فرو می‌ریزد.

۲) یک خاکریز از رس ریزدانهٔ اشباع که به سرعت اجرا می‌شود و به علت عدم تحکیم تحت اثر وزن خود، بلافاصله پس از ساخت به‌طور ناگهانی فرو می‌ریزد.

۳) یک خاکریز از رس ریزدانهٔ اشباع که به سرعت اجرا می‌شود و مدت‌ها پس از تحکیم (تحت اثر وزن خود)، دچار لغزش تدریجی می‌گردد.

۴) یک خاکریز از ماسهٔ درشت دانهٔ اشباع که به سرعت اجرا می‌شود و مدت‌ها پس از ساخت فرو می‌ریزد.

پاسخ: قبل از پاسخ دادن به این تست، ابتدا دقت کنید که در خاک‌های درشت‌دانهٔ اشباع، در هر صورت (دراز مدت و کوتاه مدت) به علت نفوذپذیری بالا، خاک زهکشی شده ($\Delta u = ۰$) و تنش مؤثر حاکم می‌شود. از طرفی در خاک‌های ریزدانهٔ اشباع، در کوتاه مدت به علت نفوذپذیری پایین خاک فرصت صفر کردن Δu و انجام زهکشی را ندارد و تنش کل حاکم است، ولی در دراز مدت بالاخره خاک Δu را صفر می‌کند و زهکشی می‌شود، بنابراین تنش مؤثر حاکم خواهد شد.

در پاسخ به این تست می‌توان گفت:

گزینهٔ (۱) ⇐ درشت‌دانهٔ اشباع (کوتاه مدت) ⇐ حاکمیت تنش مؤثر

گزینهٔ (۲) ⇐ ریزدانهٔ اشباع در کوتاه مدت ⇐ حاکمیت تنش کل ✓ ⇐ پاسخ صحیح تست

گزینهٔ (۳) ⇐ ریزدانه اشباع در دراز مدت ⇐ حاکمیت تنش مؤثر

گزینهٔ (۴) ⇐ درشت‌دانهٔ اشباع (دراز مدت) ⇐ حاکمیت تنش مؤثر

C-۲- بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک در حضور آب

در بحث مقاومت برشی خاک تا اینجای فصل، دو رابطهٔ مهم و اساسی زیر را به شما معرفی کردیم:

$$\begin{cases} \tau_f = \sigma \tan\phi + c & \text{(رابطهٔ مور - کولمب)} \\ \sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲(۴۵+\dfrac{\phi}{۲}) + ۲c\tan(۴۵+\dfrac{\phi}{۲}) & \text{(رابطه گسیختگی تنش‌های اصلی)} \end{cases}$$

همانطورکه دیدید این روابط در شرایطی به‌دست آمده‌اند که بحث حضور آب در خاک مطرح نبود. حال می‌خواهیم ببینیم که در صورت حضور آب در خاک و اشباع بودن آن، دو رابطهٔ فوق به چه صورت استفاده می‌شوند؟

در پاسخ باید بگوییم که این موضوع دقیقاً بستگی به حاکمیت تنش مؤثر و حاکمیت تنش کل دارد که در بخش قبلی با آن آشنا شدید. از این‌رو کاربرد این دو رابطه را به‌صورت جداگانه در دو حالت حاکمیت تنش مؤثر و حاکمیت تنش کل بررسی می‌کنیم.

حاکمیت تنش مؤثر

به‌هنگام حاکمیت تنش مؤثر در به‌کارگیری روابط فوق باید:

۱) تنش‌های قائم و افقی به‌صورت تنش‌های مؤثر (σ') استفاده شوند.

۲) پارامترهای مقاومت برشی خاک به‌صورت پارامترهای مؤثر (c' ، ϕ') استفاده شوند که به آنها پارامترهای مقاومت برشی مربوط به حالت حاکمیت تنش مؤثر می‌گوییم و در حالت کلی با ϕ و c فرق دارند و لزوماً با آنها برابر نیستند.

نتیجه: دو رابطه اصلی مقاومت برشی، در حالت حاکمیت تنش مؤثر در خاک به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\tau_f = \sigma' \tan\phi' + c'$$

$$\sigma'_۱ = \sigma'_۳ \tan^۲(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) + ۲c'\tan(۴۵+\frac{\phi'}{۲})$$

حاکمیت تنش کل

به‌هنگام حاکمیت تنش کل در به‌کارگیری روابط گفته شده باید:

۱) تنش های قائم و افقی به‌صورت تنش های کل (σ) استفاده شوند.

۲) پارامترهای مقاومت برشی خاک به‌صورت ϕ و c استفاده شوند که به آنها پارامترهای مقاومت برشی مربوط به حالت حاکمیت تنش کل گفته می‌شود.

نتیجه: دو رابطه اصلی مقاومت برشی، در حاکمیت تنش کل به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\tau_f = \sigma \tan\phi + c$$

$$\sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲(۴۵+\frac{\phi}{۲}) + ۲c\tan(۴۵+\frac{\phi}{۲})$$

تذکر مهم: در مورد پارامترهای مقاومت برشی خاک به هنگام حضور آب (در خاک اشباع) می‌توان گفت:

۱) در خاک‌های دانه‌ای اشباع مثل حالت خشکشان، چسبندگی ناچیز و تقریباً برابر صفر است. از سوی دیگر زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک نیز همواره به‌صورت ϕ' بوده و با ϕ مربوط به حالت خشک خاک برابر است.

۲) در خاک‌های رسی اشباع سه حالت به شرح زیر ممکن است اتفاق بیافتد:

حالت ۱ (خاک رس عادی تحکیم یافته باشد): در این حالت به علت پر آب بودن خاک رس، چسب آن عملاً از کار می‌افتد و چسبندگی تقریباً برابر صفر می‌شود. بدیهی است که در این شرایط مقاومت خاک تنها از طریق اصطکاک بین ذرات خاک تأمین می‌شود.

حالت ۲ (خاک رس پیش تحکیم یافته باشد): در این حالت برخلاف رس عادی تحکیم یافته، چسبندگی مخالف صفر بوده و هر دو عامل اصطکاک و چسبندگی در تأمین مقاومت خاک مشارکت دارند.

حالت ۳ (خاک رس صرفاً چسبنده باشد): اگر خاک رس اشباع (عادی تحکیم یافته یا پیش تحکیم یافته) در شرایط زهکشی نشده بارگذاری و گسیخته شود، در آن‌صورت ضمن آنکه اصطکاک خاک از کار می‌افتد، چسب جدیدی نیز ایجاد می‌شود که همهٔ مقاومت خاک را تأمین می‌کند. به این چسب جدید **مقاومت برشی زهکشی نشده خاک*** می‌گوییم و خاک رس در این حالت را **خاک رس صرفاً چسبنده** می‌نامیم.

نتیجه مهم

خاک رس در حالت کلی در یکی از سه طبقه‌بندی زیر قرار می‌گیرد:

۱- خاک رس صرفاً اصطکاکی (رس عادی تحکیم یافته)

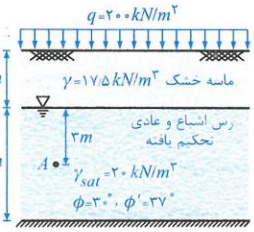
۲- خاک رس چسبنده (رس پیش تحکیم یافته و رس خشک)

۳- خاک رس صرفاً چسبنده (رس اشباع در شرایط زهکشی نشده)

تمرین ۱۱: یک بار گسترده به شدت $q = 200\ kN/m^2$، در یک سطح وسیع و به‌سرعت بر روی خاک نشان داده شده در شکل وارد می‌شود. مقاومت برشی خاک در صفحهٔ افقی گذرنده از نقطهٔ A در هر یک از حالت‌های زیر چند kN/m^2 می‌باشد؟ ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$)

الف) قبل از اعمال بار گسترده

ب) مدت مدیدی بعد از اعمال بار



● پاسخ

الف) قبل از اعمال بار گسترده q، خاک رس اشباع تحت اثر وزن خود به‌طور عادی تحکیم یافته است و یک شرایط زهکشی شده با حاکمیت تنش مؤثر داریم، بنابراین با استفاده از پارامترهای مؤثر مقاومت برشی، τ_f را در صفحهٔ افقی گذرنده از نقطهٔ A به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$\begin{cases} \tau_f = \sigma' \tan\phi' + c' \\ \sigma' = 17/5 \times 4 + (20-10) \times 3 = 100\ kN/m^2 \end{cases} \xrightarrow[(c'=0)]{\text{رس عادی تحکیم یافته}} \tau_f = 100 \times \underbrace{\tan 37^\circ}_{\frac{3}{4}} + 0 = 75\ kN/m^2$$

ب) مدت مدیدی بعد از اعمال بار گستردهٔ q، تنش مؤثر در نقطهٔ A به اندازهٔ بار وارده افزایش یافته و فشار آب حفره‌ای اضافه شده در اثر اعمال بار q محو شده است. در این شرایط با حاکمیت تنش مؤثر روبرو هستیم و می‌توان نوشت:

$$\tau_f = \sigma' \tan\phi' + c' = (100 + 200) \times \tan 37^\circ + 0 = 225\ kN/m^2$$

---

* مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک که آن را با c_u نشان می‌دهیم، بحث مفصلی است که در مورد آن در قسمت مربوط به انواع آزمایش‌های سه محوری (توضیح آزمایش UU) به‌طور کامل صحبت خواهیم کرد.

بررسی یک موضوع پرکاربرد در کنکور

می‌دانیم اگر خاک در شرایط زهکشی نشده بارگذاری و گسیخته شود، در آن‌صورت تنش کل حاکم بوده و پارامترهای مقاومت برشی خاک به‌صورت زهکشی نشده (c, ϕ) به‌کار می‌روند. حال این سؤال مطرح است که آیا می‌توان در شرایط زهکشی نشده از پارامترهای مقاومت برشی زهکشی شدهٔ خاک (c', ϕ') استفاده کرد؟

در پاسخ به این سؤال باید گفت، اگر فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی (u_f) را اندازه‌گیری کرده باشیم، در آن‌صورت می‌توان با کم کردن u_f از σها، تنش مؤثر را حاکم کرده و از پارامترهای مؤثر مقاومت برشی یعنی ϕ' و c' استفاده کرد:

شرایط زهکشی نشده:

حاکمیت تنش کل: $\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\phi}{2})$

حاکمیت تنش مؤثر: $\underbrace{(\sigma_1 - u_f)}_{\sigma'_1} = \underbrace{(\sigma_3 - u_f)}_{\sigma'_3} \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2})$

این موضوع یعنی پارامترهای مؤثر مقاومت برشی (ϕ', c') را می‌توان علاوه بر شرایط زهکشی شده در شرایط زهکشی نشده هم به‌کار برد، به شرط آنکه در شرایط زهکشی نشده، فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی را اندازه‌گیری کرده باشیم.

در ادامه با حل دو تمرین، این موضوع را بیشتر بررسی می‌کنیم.

تمرین ۱۲: پارامترهای مؤثر مقاومت برشی برای یک خاک رس برابر $c' = 10\sqrt{3}\ kN/m^2$ و $\phi' = 30°$ می‌باشند. اگر یک نمونه از این خاک ابتدا تحت فشار همه جانبه $\sigma_3 = 300\ kN/m^2$ محکم شود و سپس در شرایط زهکشی نشده با تنش قائم $\sigma_1 = 475\ kN/m^2$ گسیخته گردد، در آن‌صورت فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی کدام است؟ (سراسری - ۷۳)

۱) $215/5\ kN/m^2$ ۲) $475\ kN/m^2$ ۳) $300\ kN/m^2$ ۴) $242/5\ kN/m^2$

حل: با توجه به اینکه در این آزمایش زهکشی نشده پارامترهای مؤثر مقاومت برشی را داریم، بنابراین با برقراری حاکمیت تنش مؤثر، به‌صورت زیر u_f را می‌یابیم:

$$(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2})$$

$$\Rightarrow (475 - u_f) = (300 - u_f)\tan^2(45+\frac{30}{2}) + 2\times 10\sqrt{3}\times\tan(45+\frac{30}{2})$$

$$\Rightarrow (475 - u_f) = (300 - u_f)\times 3 + 60 \Rightarrow u_f = 242/5\ kN/m^2$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۱۳: یک نمونه خاک رس عادی تحکیم یافته ابتدا با فشار همه جانبهٔ $\sigma_3 = \sigma$ محکم شده و سپس در شرایط زهکشی نشده گسیخته می‌شود. اگر در لحظهٔ گسیختگی $\sigma_1 = 3\sigma$ و $u_f = \frac{1}{3}\sigma$ باشند، در آن‌صورت:

الف) پارامترهای مقاومت برشی مربوط به حالت تنش کل را به‌دست آورید.

ب) پارامترهای مقاومت برشی مربوط به حالت تنش مؤثر را به‌دست آورید.

ج) اگر فشار همه جانبه σ_3 دو برابر شود، فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی چند برابر حالت اولیه خواهد شد؟

(راهنمایی: می‌توانید رابطه گسیختگی تنش‌های اصلی را به‌صورت $\sigma_1 = \sigma_3(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}) + 2c(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi})$ نیز به‌کار ببرید.)

حل: در خاک رس عادی تحکیم یافته $c = c' = 0$ است، بنابراین هدف ما در قسمت‌های (الف) و (ب) از این سؤال، یافتن ϕ و ϕ' است.

الف) رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را با حاکمیت تنش کل، به فرمی که در صورت سؤال راهنمایی شده است، می‌نویسیم:

$$\sigma_1 = \sigma_3(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}) + \underbrace{2c(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi})}_{} \Rightarrow 3\sigma = \sigma\times\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} + 0 \Rightarrow \sin\phi = \frac{1}{2} \Rightarrow \phi = 30°$$

این عبارت صفر است چون $c = 0$ می‌باشد.

ب) در ادامه رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را با لحاظ کردن مقدار فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی و براساس حاکمیت تنش مؤثر می‌نویسیم:

$$(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)\left(\frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right) + 2c'\left(\frac{\cos\phi'}{1-\sin\phi'}\right) \Rightarrow (3\sigma - \frac{1}{3}\sigma) = (\sigma - \frac{1}{3}\sigma)\left(\frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right) + 0$$

این عبارت صفر است چون $c' = 0$ می‌باشد.

$$\Rightarrow \sin\phi' = 0/6 \Rightarrow \phi' = 37^\circ$$

ج) از آنجائی‌که پارامترهای مقاومت برشی، جزء مشخصات خاک بوده و با تغییر تنش‌ها تغییر نمی‌کنند، بنابراین با دو برابر شدن σ_3 نسبت به حالت اول، این پارامترها ثابت بوده و می‌توان نوشت:

$$\sigma_1 = \sigma_3\left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right) + 2c\left(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi}\right) \Rightarrow \sigma_1 = 2\sigma \times \frac{1+\sin 30}{1-\sin 30} + 0 = 6\sigma$$

σ_3: دو برابر حالت اول است.

$$(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)\left(\frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right) + 2c'\left(\frac{\cos\phi'}{1-\sin\phi'}\right) \Rightarrow (6\sigma - u_f) = (2\sigma - u_f)\left(\frac{1+\sin 37^\circ}{1-\sin 37^\circ}\right) + 0 \Rightarrow u_f = \frac{2}{3}\sigma = 2u_{f_{\text{اولیه}}}$$

همانطورکه مشاهده کردید، در قسمت (ج) این سؤال، با مسئله دشواری روبرو شدیم.

قسمت چهارم: مروری کلی بر آزمایش‌های مقاومت برشی خاک

در این قسمت می‌خواهیم شما را با آزمایش‌های مقاومت برشی خاک آشنا کنیم. توجه کنید که هدف اصلی از انجام این آزمایش‌ها، تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک است که با گسیخته کردن نمونه‌های خاک و ترسیم خط مور- کولمب به‌دست می‌آید.

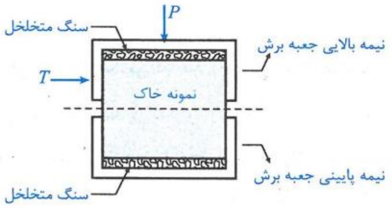
آزمایش‌های متداول در تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک عبارتند از:

۱- آزمایش برش مستقیم   **۲- آزمایش‌های سه محوری**

در ادامهٔ بحث، شرح کلی این آزمایش‌ها را بیان می‌کنیم.

D-۱- آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم که به آن **آزمایش جعبهٔ برش** نیز گفته می‌شود، همان آزمایشی است که در قسمت اول این فصل کم و بیش با آن آشنا شدید. این آزمایش مطابق شکل و به شرح زیر انجام می‌شود*:



۱) نمونهٔ مکعبی یا استوانه‌ای از خاک موردنظر را به‌صورت دست‌نخورده تهیه کرده و در جعبه برش قرار می‌دهیم. این جعبه از دو نیم‌جعبه بالایی و پایینی که به‌ترتیب متحرک و ثابت‌اند، تشکیل شده است.

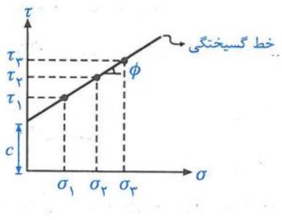
۲) بار قائم P را که مقدار آن در طول آزمایش ثابت است، به نمونه وارد می‌کنیم.

۳) نیروی افقی T را به‌صورت تدریجی به جعبهٔ متحرک وارد کرده تا خاک گسیخته شود.

۴) تنش‌های قائم و برشی در صفحهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر محاسبه کنیم:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad , \quad \tau = \frac{T}{A}$$

۵) با تغییر در مقدار P، آزمایش را برروی نمونه‌هایی دیگر از همان خاک تکرار کرده و تنش‌های برشی و قائم (σ, τ) نظیر هر آزمایش را به‌دست می‌آوریم.



۶) در مرحلهٔ آخر، σ و τهای نظیر هر آزمایش برروی یک نمودار به‌صورت مقابل ترسیم می‌شوند و عملاً با رسم این خط که همان خط گسیختگی است، پارامترهای مقاومت برشی خاک به‌دست می‌آیند. (c عرض از مبدأ این خط و ϕ زاویه خط با امتداد افق است.)

تذکر مهم: در حل مسئله‌های آزمایش برش مستقیم کافی است نتیجه‌های مربوط به تنش‌های σ و τ در هر آزمایش را در رابطه مور- کولمب قرار دهیم. به این‌ترتیب با دو بار انجام آزمایش و تشکیل یک **دستگاه دو معادله دو مجهولی** و حل آن، می‌توان پارامترهای مقاومت برشی خاک را به‌دست آورد.

---

* براساس تجهیزات مورد استفاده در آزمایش برش مستقیم، این آزمایش می‌تواند به دو صورت انجام شود: ۱- کنترل تغییر مکان و ۲- کنترل تنش که البته اکثر آزمایش‌های برش مستقیم با روش کنترل تغییر مکان انجام می‌شوند.

زیر شاخه‌های قسمت چهارم

D-۱- آزمایش برش مستقیم

D-۲- آزمایش‌های سه محوری

در ادامه با حل یک تمرین، شما را با مسئله‌های آزمایش برش مستقیم آشنا می‌کنیم.

تمرین ۱۴: در انجام آزمایش برش مستقیم بر روی یک خاک، نمونهٔ اول تحت تنش قائم $1\,kg/cm^2$ و تنش برشی $0/85\,kg/cm^2$ و نمونهٔ دوم تحت تنش قائم $1/2\,kg/cm^2$ و تنش برشی $1\,kg/cm^2$ گسیخته می‌گردد. چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک را به‌دست آورید.

حل: نتایج دوبار انجام آزمایش برش مستقیم را در اختیار داریم. با قرار دادن مقادیر تنش‌ها در رابطهٔ مور - کولمب، خواهیم داشت:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c \Rightarrow \begin{cases} 0/85 = 1 \times \tan\phi + c \\ 1 = 1/2 \times \tan\phi + c \end{cases}$$

دو رابطه را از هم کم می‌کنیم: $\Rightarrow (1 - 0/85) = (1/2 - 1)\tan\phi + 0 \Rightarrow \tan\phi = \frac{3}{4} \Rightarrow \phi = 37^\circ \;,\; 0/85 = 1 \times 0/75 + c \Rightarrow c = 0/1\,kg/cm^2$

حال بیایید با بررسی چند سؤال، نکات تکمیلی آزمایش برش مستقیم را یاد بگیریم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: آیا سرعت بارگذاری در نتایج آزمایش برش مستقیم نقش دارد؟

پاسخ: آزمایش برش مستقیم را می‌توان با ریختن آب در داخل جعبهٔ برش، در حالت اشباع نیز انجام داد. در این حالت بسته به نوع خاک، سرعت بارگذاری می‌تواند حائز اهمیت باشد.

سؤال ۲: با تنظیم سرعت بارگذاری چگونه می‌توان شرایط زهکشی شده یا زهکشی نشده در یک خاک را مدل‌سازی کرد؟

پاسخ: اگر امکان خروج آب از نمونه فراهم باشد و سرعت بارگذاری نیز آنقدر کم باشد (به‌خصوص در رس‌ها) که در لحظهٔ گسیختگی، اضافه فشار آب حفره‌ای صفر باشد، در آن‌صورت یک **آزمایش زهکشی شده** خواهیم داشت. در طرف مقابل اگر امکان خروج آب از نمونه فراهم نباشد و یا با وجود امکان خروج آب، سرعت بارگذاری آنقدر زیاد باشد که در لحظهٔ‌گسیختگی، اضافه فشار آب حفره‌ای صفر نشده باشد، در آن‌صورت یک **آزمایش زهکشی نشده** خواهیم داشت.

تذکر: در آزمایش زهکشی شده تحمل بار وارده به عهدهٔ دانه‌های جامد بوده و شرایط تنش مؤثر حاکم است ولی در آزمایش زهکشی نشده تحمل بار وارده به عهدهٔ کل تودهٔ خاک بوده و شرایط تنش کل حاکم است.

سؤال ۳: نقش سرعت بارگذاری در خاک‌های ماسه‌ای و رسی چگونه است؟

پاسخ: اگر خاک مورد آزمایش ماسه‌ای باشد، سرعت بارگذاری مهم نیست و نمونه با سرعت بارگذاری معمولی هم (حدود ۵ دقیقه)، اضافه فشار آب حفره‌ای خود را در لحظهٔ‌گسیختگی از دست می‌دهد و یک آزمایش زهکشی شده با حاکمیت تنش مؤثر خواهیم داشت.

حال اگر خاک مورد آزمایش رسی باشد، سرعت بارگذاری اهمیت پیدا می‌کند. در سرعت بارگذاری بالا (آزمایش تند) نمونه فرصت از دست دادن اضافه فشار آب حفره‌ای خود و زهکشی شدن را نداشته و تنش کل حاکم می‌گردد، درصورتی‌که در سرعت بارگذاری پایین (آزمایش کند که ۲ تا ۵ روز طول می‌کشد)، این امکان وجود دارد که نمونهٔ رسی در لحظهٔ گسیختگی اضافه فشار آب حفره‌ای خود را از دست داده باشد و یک آزمایش زهکشی شده با حاکمیت تنش مؤثر داشته باشیم.

نتیجه: به‌طور خلاصه می‌توان بحث فوق را به‌صورت زیر بیان کرد:

آزمایش برش مستقیم در حالت اشباع
- **در خاک ماسه‌ای** ⇐ همواره تنش مؤثر حاکم است.
- **در خاک رسی** ⇐
  - آزمایش تند ⇐ تنش کل حاکم است.
  - آزمایش کند ⇐ می‌تواند تنش مؤثر حاکم گردد.

سؤال ۴: آیا آزمایش برش مستقیم را به‌عنوان یک آزمایش دقیق پیشنهاد می‌کنید؟ چرا؟

پاسخ: خیر زیرا این آزمایش دارای ایرادهای اساسی زیر است:

۱) صفحهٔ گسیختگی اجباری است. یعنی نمونه به‌جای اینکه در امتداد ضعیف‌ترین سطح (که یک صفحه مورب با زاویه $\theta = 45 + \frac{\phi}{2}$ است) شکسته شود، در امتداد صفحهٔ افقی، به‌صورت اجباری گسیخته می‌شود و برش آن مستقیم است.

۲) شروع گسیختگی نمونه از کناره‌های آن است و این به معنی بیشتر بودن تنش برشی در کناره‌ها و به بیان دیگر توزیع غیریکنواخت تنش برشی است.

۳) صفر شدن اضافه فشار آب حفره‌ای در نمونه را نمی‌توان کنترل کرد، زیرا هیچ وسیله‌ای وجود ندارد که این اندازه‌گیری را نشان دهد. از این‌رو این آزمایش برای رس‌ها در شرایط آزمایش زهکشی شده چندان دقیق نیست.

سؤال ۵: با توجه به ایرادهای آزمایش برش مستقیم چه آزمایشی را برای ثبت نتایج دقیق‌تر، پیشنهاد می‌کنید؟

● پاسخ: باتوجه به معایب آزمایش برش مستقیم، جایگزین نمودن یک آزمایش دقیق‌تر که در آن ایرادهای آزمایش برش مستقیم رفع شده باشد، منطقی به‌نظر می‌رسد، هر چند که این موضوع با هزینهٔ بیشتری همراه است. برهمین اساس برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌توان از آزمایش سه محوری استفاده کرد. آزمایش سه محوری برخلاف آزمایش برش مستقیم می‌تواند فشار آب حفره‌ای را در هر مرحله از آزمایش اندازه‌گیری کند و در ضمن، گسیختگی نمونه نیز معمولاً در امتداد یک سطح قطری (بحرانی‌ترین صفحه) که زاویه آن براساس مقاومت خاکها متفاوت است، اتفاق می‌افتد.

حال در ادامه می‌خواهیم آزمایش سه محوری را در بخش بعدی شرح دهیم.

D-۲- آزمایش‌های سه محوری

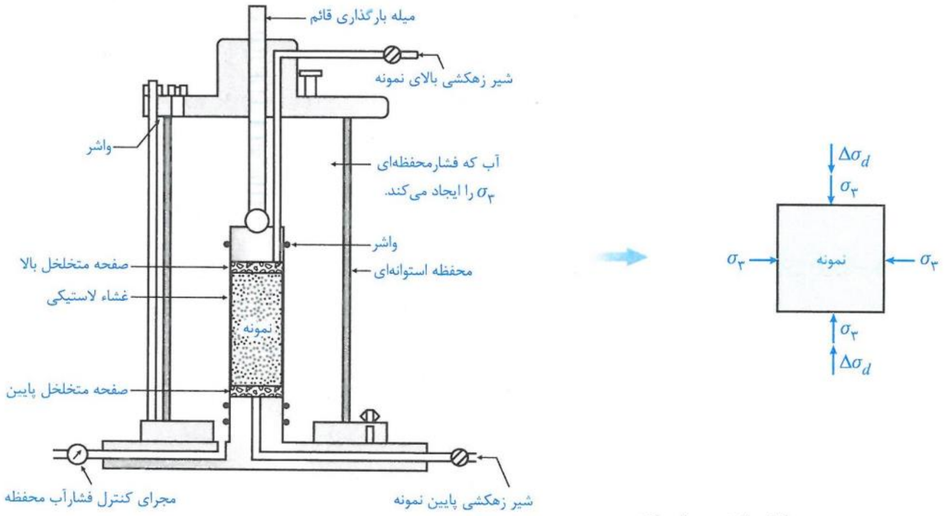
همانطورکه در قسمت دوم این فصل دیدیم، برای مدل‌سازی شرایط خرابی یک المان و بررسی گسیختگی آن، لازم است یک نمونه از خاک موردنظر را از عمق به سطح خاک آورده و در آزمایشگاه با انجام مراحل زیر، تحت بارگذاری قرار داده و گسیخته کنیم:

مرحلهٔ اول: اعمال فشار همه جانبه σ_3 که منجر به محکم شدن نمونه خواهد شد.

مرحلهٔ دوم: اعمال تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ که با بزرگ کردن قطر دایرهٔ مور، در نهایت باعث تماس این دایره با خط مور- کولمب و گسیختگی خاک می‌شود. (ما در قسمت دوم این فصل، لحظهٔ گسیختگی را مرحلهٔ سوم نامیده بودیم.)

حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که چگونه و با چه ابزاری می‌توان در آزمایشگاه این مراحل را انجام داد؟

در پاسخ به این سؤال باید بگوییم که این مراحل در آزمایشگاه توسط آزمایش سه محوری انجام می‌شوند که شکل دستگاه آن به‌صورت زیر است:



در توضیح آزمایش سه محوری و شرح دستگاه بالا می‌توان گفت:

۱) در آزمایش سه محوری ابتدا یک نمونهٔ دست‌نخورده از خاک موردنظر تهیه می‌کنیم و آن را درون یک غشاء لاستیکی قرار می‌دهیم. سپس غشاء لاستیکی را مطابق شکل، همراه با نمونهٔ درون آن، در داخل محفظهٔ استوانه‌ای قرار می‌دهیم و ضمن اشباع کردن نمونه از طریق شیرهای زهکشی بالا و پایین نمونه، اطراف نمونه (اطراف غشاء لاستیکی) را هم با آب پر می‌کنیم.

تذکر: علت استفاده از غشاء لاستیکی آن است که:

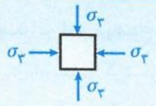
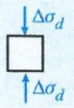
الف) آب اطراف نمونه با آب داخل نمونه و خود نمونه، در تماس مستقیم نباشد.

ب) نمونه بتواند بر خلاف آزمایش تحکیم، تغییر شکل جانبی هم بدهد.

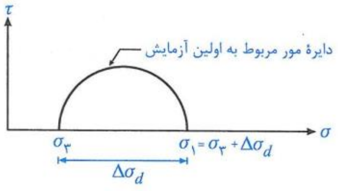
۲) با افزایش فشار آب اطراف نمونه توسط منبع اعمال فشار، فشار همه جانبه σ_3 را به نمونه وارد می‌کنیم و مقدار آن را تا فشار جانبی خاک در طبیعت افزایش می‌دهیم (مرحله اول). لازم به ذکر است که به σ_3، فشار محفظه‌ای و فشار سلولی نیز گفته می‌شود.

۳) توسط میلهٔ بارگذاری قائم، نمونه را تحت نیروی محوری F_d قرار می‌دهیم تا تنش ناشی از این نیرو که تنش انحرافی ($\Delta\sigma_d$) نامیده می‌شود، باعث گسیختگی نمونه گردد (مرحله دوم). لازم به ذکر است که به $\Delta\sigma_d$، اضافه تنش قائم و تفاوت تنش‌های اصلی نیز گفته می‌شود.

حال برای مقایسه شرایط بارگذاری تئوری و آزمایشگاهی به جدول زیر دقت کنید:

	تئوری	آزمایشگاه
مرحله اول		فشار آب اطراف نمونه
مرحله دوم		تنش ایجاد شده توسط نیروی میلهٔ بارگذاری قائم

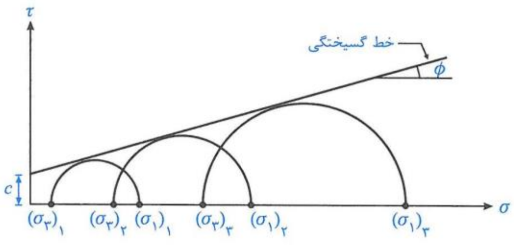
پس از طی مراحل فوق و گسیخته شدن نمونهٔ خاک، با کمک مقادیر σ_3 و σ_1، دایرهٔ مور نظیر این تنش‌ها را رسم می‌کنیم:



$\sigma_3 =$ فشار همه‌جانبهٔ آب اطراف نمونه

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d = \sigma_3 + \frac{F_d}{A}$$

A: مساحت نمونه در لحظهٔ گسیختگی



در ادامه با تغییر در مقادیر فشار همه جانبه σ_3 (بیشتر از فشار جانبی خاک در طبیعت)، آزمایش را بر روی نمونه‌های دیگری از همان خاک تکرار می‌کنیم و در نتیجه σ_1های نظیر با σ_3ها، به‌دست می‌آیند. سپس با ترسیم دایرهٔ مور مربوط به هر زوج (σ_3, σ_1) و رسم مماس مشترک این دایره‌ها، خط گسیختگی به‌دست می‌آید که با کمک آن می‌توان پارامترهای مقاومت برشی خاک را تعیین کرد.

چند تذکر مهم:

۱) شیرهای زهکشی تعبیه شده در بالا و پایین نمونه، برای ورود و خروج آب به داخل نمونه به‌کار می‌روند و علاوه بر آن می‌توان آنها را به وسایل اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای نیز متصل کرد.

۲) برای یک خاک زاویه اصطکاک داخلی به‌دست آمده از آزمایش برش مستقیم کمی بزرگتر از زاویه اصطکاک داخلی به‌دست آمده از آزمایش سه‌محوری است. علت آن است که در آزمایش برش مستقیم سطح گسیختگی اجباری بوده و الزاماً ضعیف‌ترین سطح در خاک نمی‌باشد. این در حالی است که در آزمایش سه محوری، نمونه در ضعیف‌ترین سطح گسیخته می‌شود. روابط تجربی زیر زاویه اصطکاک داخلی خاک به‌دست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری و برش مستقیم را با هم مقایسه می‌کند.

$\phi_{\text{برش مستقیم}} = \phi_{\text{سه محوری}} + (3^\circ \sim 4^\circ)$, $\phi_{\text{برش مستقیم}} = 1.1 \times \phi_{\text{سه محوری}}$

۳) در حل مسئله‌های مربوط به آزمایش سه محوری چنانچه یافتن پارامترهای مقاومت برشی خاک مطرح باشد، بایستی نتیجه‌های مربوط به تنش‌های σ_1 و σ_3 در هر آزمایش را در رابطه گسیختگی تنش‌های اصلی قرار دهیم. به این ترتیب با تشکیل **یک دستگاه دو معادله دو مجهولی** و حل آن می‌توان پارامترهای مقاومت برشی خاک را به‌دست آورد.

در ادامه با حل دو تمرین، با آزمایش سه محوری بیشتر آشنا می‌شویم.

تمرین ۱۵: نتایج آزمایش‌های سه محوری برروی سه نمونه از یک خاک در حین گسیختگی، به‌شرح جدول زیر است. پارامترهای مقاومت برشی این خاک را تعیین کنید.

	آزمایش اول	آزمایش دوم	آزمایش سوم
$\sigma_3 (kPa)$	۱۰۰	۱۸۰	۳۰۰
$\Delta\sigma_d (kPa)$	۲۶۰	۴۲۰	۶۶۰

حل: برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک با استفاده از آزمایش سه محوری، انجام دو آزمایش کافی است. به‌همین علت برای حل این مسئله نتایج آزمایش‌های اول و دوم را در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی جایگذاری کرده و می‌نویسیم:

$$\boxed{\sigma_1} = \sigma_3 \tan^2\theta + 2c\tan\theta \begin{cases} (100+260) = 100\times \tan^2\theta + 2c\tan\theta \\ (180+420) = 180\times \tan^2\theta + 2c\tan\theta \end{cases}$$

$\sigma_1 \rightarrow \sigma_3 + \Delta\sigma_d$

دو رابطه را از هم کم می‌کنیم: $\Rightarrow (600-360) = (180-100)\times \tan^2\theta + 0 \Rightarrow \tan^2\theta = 3$

$$\Rightarrow \tan(45+\frac{\phi}{2}) = \sqrt{3} \Rightarrow 45+\frac{\phi}{2} = 60^\circ \Rightarrow \phi = 30^\circ$$

حال با جایگذاری مقدار $\tan\theta$ در یکی از رابطه‌ها، مثلاً رابطهٔ مربوط به آزمایش اول خواهیم داشت:

$$100+260 = 100\times 3 + 2\times c\times\sqrt{3} \Rightarrow c = 10\sqrt{3}\ kPa$$

تمرین ۱۶: مقادیر تنش‌های قائم و برشی در صفحهٔ شکست خاکی ماسه‌ای که تحت آزمایش سه محوری گسیخته می‌شود، به‌ترتیب $300\,kPa$ و $100\sqrt{3}\,kPa$ است. زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای و تنش‌های اصلی در هنگام گسیختگی کدامند؟ (سراسری - ۷۶)

۱) $\phi = 30^\circ$، $\sigma_1 = 600\,kPa$ و $\sigma_3 = 200\,kPa$

۲) $\phi = 30^\circ$، $\sigma_1 = 300\,kPa$ و $\sigma_3 = 100\,kPa$

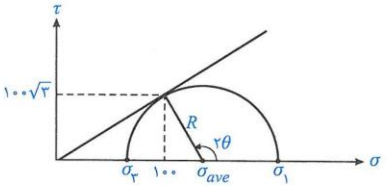
۳) $\phi = 60^\circ$، $\sigma_1 = 600\,kPa$ و $\sigma_3 = 200\,kPa$

۴) $\phi = 60^\circ$، $\sigma_1 = 300\,kPa$ و $\sigma_3 = 100\,kPa$

حل: در خاک ماسه‌ای $c=0$ است و مقدار ϕ را نیز با استفاده از مقادیر τ و σ در صفحهٔ شکست و به‌کارگیری رابطهٔ مور- کولمب، به‌صورت زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c \Rightarrow 100\sqrt{3} = 300\times\tan\phi + 0 \Rightarrow \tan\phi = \frac{\sqrt{3}}{3} \Rightarrow \phi = 30^\circ$$

حال با ترسیم دایره مور تنش‌ها در این حالت، خواهیم داشت:



$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} = 45^\circ + \frac{30^\circ}{2} = 60^\circ$$

$$100\sqrt{3} = R\ \sin(180-2\theta)$$

$$\Rightarrow 100\sqrt{3} = (\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2})\ \boxed{\sin(180^\circ - 2\times 60^\circ)} \Rightarrow \sigma_1 - \sigma_3 = 400$$

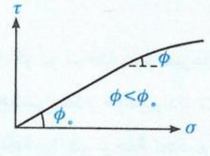
$\sin(180^\circ - 2\times 60^\circ) \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2}$

بله درست حدس زده‌اید، دیگر نیازی به ادامهٔ حل نیست! کافیست به گزینه‌ها نگاه کنید؛ تنها گزینهٔ (۱) است که در رابطهٔ فوق صدق کرده و پاسخ درست است. ($\sigma_1 = 600\,kPa$ ، $\sigma_3 = 200\,kPa$)

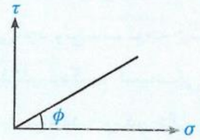
* به نظر شما اگر بدون داشتن گزینه‌ها می‌خواستیم σ_1 و σ_3 را به‌دست آوریم، چگونه عمل می‌کردیم؟

بررسی یک موضوع مهم

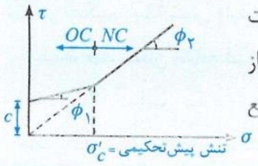
پس از انجام آزمایش سه محوری، حاصل ترسیم خط گسیختگی (پوشش گسیختگی) در انواع خاک‌ها به‌صورت زیر خواهد بود:



الف) خاک‌های دانه‌ای: در خاک‌های دانه‌ای با توجه به صفر بودن چسبندگی خاک، خط گسیختگی از مبدأ مختصات می‌گذرد. حال اگر خاک دانه‌ای مورد نظر ما، مثل شن درشت‌دانه باشد، در آن‌صورت فشارهای همه جانبهٔ زیاد باعث سایش و خرد شدن گوشه‌های تیزِ دانه‌ها می‌گردد. بنابراین در تنش‌های بالا، درگیری ذرات خاک با هم کمتر شده و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد.



ب) خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته: در خاک‌های رس عادی تحکیم یافته نیز مانند خاک‌های دانه‌ای، خط گسیختگی به علت صفر بودن چسبندگی از مبدأ مختصات می‌گذرد.



ج) خاکهای رسی پیش‌تحکیم‌یافته: در خاکهای رسی پیش‌تحکیم‌یافته، پوش‌گسیختگی شامل دو قسمت است. یک قسمت مربوط به بخشی است که در آن خاک رفتار عادی‌تحکیم‌یافته دارد و امتداد این قسمت از مبدأ مختصات می‌گذرد. قسمت دیگر نیز مربوط به رفتار پیش‌تحکیم‌یافته خاک است که محور τها را قطع کرده و نشان‌دهندهٔ مخالفِ صفربودنِ چسبندگی در رس‌های پیش‌تحکیم‌یافته می‌باشد.

جزئیات بیشتر در مورد شرایط انجام یک آزمایش سه محوری

در اینجا می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، شما را با جزئیات بیشتری از شرایط انجام آزمایش سه محوری آشنا کنیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: مرحله اول یک آزمایش سه محوری را به چند صورت می‌توان انجام داد؟

● پاسخ: در این مرحله ابتدا از طریق شیرهای زهکشی، نمونه اشباع می‌شود و در ادامه در حالیکه شیرهای زهکشی بسته هستند، نمونه تحت فشار همه جانبه σ_3 قرار می‌گیرد و برای مرحله دوم آماده می‌شود ولی قبل از شروع مرحلهٔ دوم آزمایش، دو کار را می‌توان انجام داد:

الف) شیرهای زهکشی را باز کنیم و بگذاریم که نمونه تحت فشار همه جانبهٔ σ_3 تحکیم یابد. در این شرایط با خروج آب، نمونه کاهش حجم می‌دهد و دانه‌های جامد به هم نزدیک‌تر می‌شوند. پس خاک قوی و محکم می‌شود که اصطلاحاً می‌گوییم یک **آزمایش تحکیم یافته** داریم.

ب) بدون آنکه شیرهای زهکشی را باز کنیم به سراغ مرحله دوم برویم. در این شرایط واضح است که تحکیمی صورت نگرفته و خاک قوی و محکم نمی‌شود. در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم یک **آزمایش تحکیم نیافته** داریم.

سؤال ۲: مرحله دوم یک آزمایش سه محوری به چند صورت قابل انجام است؟

● پاسخ: این مرحله که به آن **مرحله برش** یا **آزمایش برش** نیز گفته می‌شود، به‌دو صورت زیر قابل انجام است:

الف) در سراسر زمان اعمال $\Delta\sigma_d$ شیرهای زهکشی باز باشند و سرعت آزمایش نیز به‌گونه‌ای باشد که در تمام طول آزمایش از جمله در لحظهٔ گسیختگی، اضافه فشار آب حفره‌ای صفر باشد. در این شرایط یک **آزمایش زهکشی شده** با **حاکمیت تنش مؤثر** داریم.

ب) در سراسر زمان اعمال $\Delta\sigma_d$ شیرهای زهکشی بسته باشند. در این شرایط نمونه امکان زهکشی و صفر کردن اضافه فشار آب حفره‌ای را نداشته و یک **آزمایش زهکشی نشده** با **حاکیمت تنش کل** داریم.

سؤال ۳: با توجه به دو سؤال قبل، چند نوع آزمایش سه محوری می‌توان انجام داد؟

● پاسخ: آزمایش سه محوری با توجه به شرایط حاکم بر مراحل اول و دوم آزمایش به سه شکل قابل انجام است که آنها را در جدول زیر نشان داده‌ایم:

مرحلهٔ اول \ مرحلهٔ دوم	زهکشی نشده Undrained	زهکشی شده Drained
تحکیم یافته Consolidated	CU	CD
تحکیم نیافته Unconsolidated	UU	نداریم *

۱- آزمایش CD
۲- آزمایش CU
۳- آزمایش UU

* اگر در مرحلهٔ دوم شیرهای زهکشی باز شوند، خود به خود تحکیم مرحلهٔ اول هم اتفاق می‌افتد و در نهایت یک آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی شده خواهیم داشت. پس عملاً آزمایش تحکیم نیافتهٔ زهکشی شده، بی‌معناست!

تذکر ۱: در مرحلهٔ تحکیم نمونه و همچنین به هنگام انجام آزمایش زهکشی شده، اضافه فشار آب حفره‌ای (ناشی از اعمال تنش) صفر می‌شود ولی باید توجه داشت که این دو مرحله کاملاً باهم متفاوت می‌باشند. تفاوت عمدهٔ آنها را می‌توان در دو مورد زیر خلاصه کرد:

(۱) در تحکیم، گسیختگی خاک مطرح نیست و با خروج آب از نمونه، دانه‌های جامد به هم نزدیکتر شده و درگیری آنها باهم بیشتر می‌شود. این در حالی است که در آزمایش زهکشی شده، درنهایت نمونه گسیخته می‌شود.

(۲) در تحکیم، ابتدا تنش وارد می‌شود و سپس منتظر می‌مانیم تا اضافه فشار آب حفره‌ای صفر گردد. در حالیکه در آزمایش زهکشی شده، صفر شدن اضافه فشار آب حفره‌ای تدریجی بوده و همزمان با اعمال تنش است.

تذکر ۲: اگر آزمایش سه محوری، بدون فشار همه جانبهٔ σ_3 در شرایط زهکشی نشده، بارگذاری و گسیخته شود، در آن‌صورت یک آزمایش تک محوری خواهیم داشت که در مورد آن در قسمت بعد به‌طور مفصل صحبت خواهیم کرد.

E-۱- بررسی آزمایش‌های سه محوری CD و CU

در قسمت قبل با مفاهیم اولیهٔ آزمایش‌های سه محوری CD و CU آشنا شده و دیدیم که:

۱- آزمایش CD یعنی آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی شده

۲- آزمایش CU یعنی آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده

در ادامه می‌خواهیم با مقایسهٔ این دو آزمایش، آنها را بهتر بشناسیم و جزئیات بیشتری را در مورد آنها یاد بگیریم. به همین منظور به بررسی سؤالات زیر می‌پردازیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: تشابه اصلی این دو آزمایش در چیست؟

● پاسخ: مرحلهٔ اول آزمایش‌های CD و CU، وجه اشتراک آنها است. در هر دو آزمایش پس از اعمال تنش همه جانبهٔ $\sigma_۳$، شیرهای زهکشی باز می‌شود تا با خروج آب، نمونه تحکیم پیدا کند. در این شرایط فشار همه جانبهٔ $\sigma_۳$ باعث محکم و قوی شدن خاک می‌گردد و مقاومت آن را افزایش می‌دهد.

سؤال ۲: تفاوت اصلی این دو آزمایش در کجاست؟

● پاسخ: تفاوت اصلی این دو آزمایش، در نحوهٔ اجرایِ مرحلهٔ دوم آنها (اعمال تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ تا گسیختگی خاک) می‌باشد، به این ترتیب که:

● در مرحلهٔ دوم آزمایش CD، شیرهای زهکشی باز هستند و سرعت بارگذاری نیز به گونه‌ای است که عملاً یک آزمایش زهکشی شده با حاکمیت تنش مؤثر داریم.

● در مرحلهٔ دوم آزمایش CU، شیرهای زهکشی بسته هستند و یک آزمایش زهکشی نشده با حاکمیت تنش کل خواهیم داشت.

تذکر: با توجه به پاسخ داده شده برای این سؤال می‌توان فهمید که:

● آزمایش CD عملاً برای مدل‌سازی شرایط حاکمیت تنش مؤثر و تعیین پارامترهای مؤثر مقاومت برشی (یعنی ϕ' و c') طراحی شده است.

● آزمایش CU عملاً برای مدل‌سازی شرایط حاکمیت تنش کل و تعیین پارامترهای مقاومت برشی مربوط به تنش کل (یعنی ϕ و c) طراحی شده است.

سؤال ۳: با توجه به مطالبی که قبلاً یاد گرفتیم، چگونه می‌توان با انجام آزمایش CU به پارامترهای مقاومت برشی در آزمایش CD (یعنی ϕ' و c') رسید؟

● پاسخ: در انتهای قسمت سوم این فصل (بررسی یک موضوع پر کاربرد در کنکور) دیدیم که اگر در شرایط زهکشی نشده، فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی را داشته باشیم، در آن‌صورت می‌توان با کم کردن این فشار آب حفره‌ای از تنش‌های اصلی کل در لحظهٔ گسیختگی، تنش مؤثر را حاکم کرده و ϕ' و c' را به‌دست آوریم. از این‌رو مشابه با قبل می‌توان گفت:

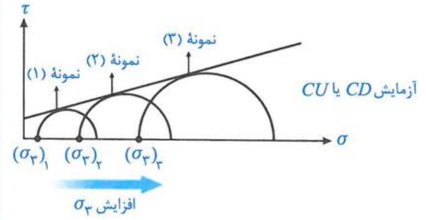
آزمایش CU $\Rightarrow$

- حاکمیت تنش کل $\Rightarrow$ $\sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) + ۲c \tan(۴۵ + \frac{\phi}{۲})$ $\Rightarrow$ c و ϕ به‌دست می‌آید.
- حاکمیت تنش مؤثر $\Rightarrow$ $(\sigma_۱ - u_f) = (\sigma_۳ - u_f) \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) + ۲c' \tan(۴۵ + \frac{\phi'}{۲})$ $\Rightarrow$ c' و ϕ' به‌دست می‌آید.

نتیجه: برای تعیین پارامترهای مؤثر مقاومت برشی (c', ϕ') از هر دو آزمایش CD و CU می‌توان استفاده کرد.

زیر شاخه‌های قسمت پنجم
E-۱- بررسی آزمایش‌های سه محوری CD و CU
E-۲- بررسی آزمایش سه محوری UU
E-۳- نمودار رفتار خاک‌ها در آزمایش‌های CD و CU
E-۴- کاربردهای عملی آزمایش‌های سه محوری

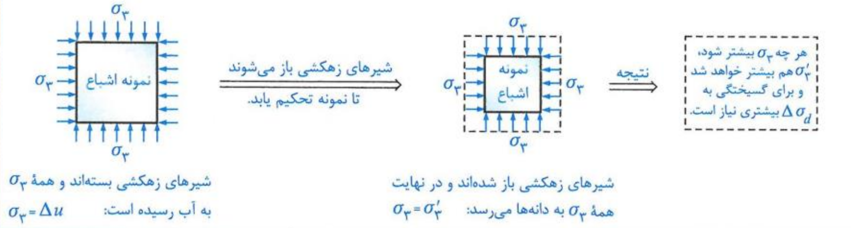
سؤال ۴: در آزمایش‌های CD و CU، با افزایش تنش همه جانبهٔ σ_3 در نمونه‌های بعدی، تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ چه تغییری می‌کند؟



● پاسخ: نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های CD و CU نشان می‌دهد که با افزایش فشار σ_3 در نمونه‌ها، تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ افزایش می‌یابد و قطر دایره‌های مور بزرگتر می‌گردند:

احتمالاً از خود می‌پرسید که چرا این اتفاق رخ داده است و اصولاً چرا باید قطر دایره‌های مور بعدی بزرگتر شوند (یعنی برای خرابی، تنش انحرافی بیشتری لازم باشد)؟

پاسخ ساده است؛ افزایش σ_3 در نمونه‌های بعدی باعث افزایش تنش مؤثر در آنها می‌شود که این خود به معنی تحکیم بیشتر و قوی‌تر شدن خاک است، پس برای گسیخته کردن نمونه‌های بعدی به $\Delta\sigma_d$ بیشتری احتیاج است. برای درک بهتر این موضوع، به شکل‌های زیر توجه کنید:



در ادامه با حل چند تمرین متنوع، این آزمایش‌ها را بهتر یاد می‌گیریم:

تمرین ۱۷: بر روی نمونه‌های مختلف از یک نوع خاک آزمایش‌های سه محوری CD و CU انجام می‌شود که نتایج آنها به شرح جدول‌های زیر است:

تنش / آزمایش	آزمایش (۱)	آزمایش (۲)
$\sigma_3 (kPa)$	۱۰۰	۲۰۰
$\Delta\sigma_d\ (kPa)$	۲۶۰	۴۶۰

آزمایش CD

تنش / آزمایش	آزمایش (۱)	آزمایش (۲)
$\sigma_3 (kPa)$	۹۰	۱۸۰
$\Delta\sigma_d\ (kPa)$	۱۳۴	۲۰۴

آزمایش CU

الف) پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت‌های تنش کل و تنش مؤثر را بیابید.

ب) مقادیر فشار آب حفره‌ای در آزمایش‌های CD و CU در لحظهٔ گسیختگی چقدر است؟

● حل:

الف) برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت‌های تنش مؤثر و تنش کل به‌ترتیب از نتایج آزمایش‌های CD و CU کمک می‌گیریم. بنابراین با جایگذاری مقادیر تنش‌های σ_1 و σ_3 در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی خواهیم داشت:

محاسبهٔ c' و ϕ':

$$CD \text{ آزمایش } \Rightarrow \boxed{\sigma'_1} = \boxed{\sigma'_3}\ \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2}) \Rightarrow$$

$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$ ، σ_3

$$\Rightarrow \begin{cases} (100+260) = 100\times\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2}) & (1) \\ (200+460) = 200\times\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2}) & (2) \end{cases}$$

$$\text{رابطهٔ (۲)} - \text{رابطهٔ (۱)} \Rightarrow (200+460-100-260) = (200-100)\times\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 0$$

$$\Rightarrow \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) = 3 = \tan^2 60^\circ \Rightarrow 45+\frac{\phi'}{2} = 60 \Rightarrow \phi' = 30^\circ$$

که با جایگذاری مقدار $3 = tan^2(45 + \frac{\phi'}{2})$ در رابطهٔ (۱) خواهیم داشت:

$$(100 + 260) = 100 \times 3 + 2c' \times \sqrt{3} \Rightarrow c' = 10\sqrt{3} = 17/3\ kPa$$

محاسبهٔ c و ϕ:

$$\text{آزمایش } CU \Rightarrow \sigma_1 = \sigma_3 tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2c\, tan(45 + \frac{\phi}{2}) \Rightarrow \begin{cases} (90 + 134) = 90 \times tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2c\, tan(45 + \frac{\phi}{2}) & (1) \\ (180 + 204) = 180 \times tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2c\, tan(45 + \frac{\phi}{2}) & (2) \end{cases}$$

$$\text{رابطهٔ (۱) - رابطهٔ (۲)} \Rightarrow (180 + 204 - 90 - 134) = (180 - 90) \times tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 0$$

$$\Rightarrow tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) = (\frac{4}{3})^2 = tan^2 53° \Rightarrow 45 + \frac{\phi}{2} = 53 \Rightarrow \phi = 16°$$

که با جایگذاری مقدار $(\frac{4}{3})^2 = tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$ در رابطهٔ (۱) خواهیم داشت:

$$(90 + 134) = 90 \times (\frac{4}{3})^2 + 2c \times \frac{4}{3} \Rightarrow c = 24\ kPa$$

ب) در آزمایش CD به‌علت زهکشی نمونه، فشار آب حفره‌ای در پایان هر دو آزمایش برابر صفر است، ولی برای محاسبهٔ فشار آب حفره‌ای در آزمایش CU کافی است تا تنش مؤثر را حاکم کرده و u_f را به‌ترتیب زیر بیابیم:

$$\underbrace{(\sigma_1 - u_f)}_{\sigma'_1} = \underbrace{(\sigma_3 - u_f)}_{\sigma'_3} tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2c' tan(45 + \frac{\phi'}{2})$$

$$\text{آزمایش (۱)}: (90 + 134 - u_{f_1}) = (90 - u_{f_1}) \times 3 + 2 \times 10\sqrt{3} \times \sqrt{3} \Rightarrow u_{f_1} = 53\ kPa$$

$$\text{آزمایش (۲)}: (180 + 204 - u_{f_2}) = (180 - u_{f_2}) \times 3 + 2 \times 10\sqrt{3} \times \sqrt{3} \Rightarrow u_{f_2} = 108\ kPa$$

نتیجه: با تغییر در مقادیر σ_3 و $\Delta\sigma_d$ در آزمایش CU، فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی (u_f) نیز متفاوت خواهد بود.

تمرین ۱۸: بر روی دو نمونه از یک خاک آزمایش سه محوری CD انجام می‌شود که نتایج آن به شرح جدول زیر است:

تنش \ آزمایش	آزمایش (۱)	آزمایش (۲)
$\sigma_3 (kN/m^2)$	۱۰۰	۱۵۰
$\Delta\sigma_d\ (kN/m^2)$	۲۰۰	۳۰۰

اگر بر روی نمونهٔ دیگری از همین خاک آزمایش CU با فشار محفظه‌ای $200\ kN/m^2$ انجام شود، فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی نمونه برابر $50\ kN/m^2$ خواهد بود. تنش انحرافی لازم برای گسیختگی نمونه در این حالت چقدر است؟

● **حل:** در پاسخ به این تمرین ابتدا باید با استفاده از نتایج آزمایش‌های CD بر روی خاک و به‌کارگیری رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی، مقادیر پارامترهای مؤثر مقاومت برشی (ϕ', c') را به‌دست آوریم. در ادامه رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را در حالت حاکمیت تنش مؤثر برای آزمایش CU بر روی همین خاک می‌نویسیم (چون ϕ' و c' را به‌دست آوردیم و u_f را هم داریم) و از آنجا با توجه به معلوم بودن σ_3، مقدار $\Delta\sigma_d$ را محاسبه می‌کنیم.

$$\text{محاسبهٔ } c' \text{ و } \phi': \begin{cases} (100 + 200) = (100)\, tan^2\theta + 2c' tan\theta & (1) \\ (150 + 300) = (150)\, tan^2\theta + 2c' tan\theta & (2) \end{cases}$$

$$\text{رابطهٔ (۱) را از رابطهٔ (۲) کم می‌کنیم} \Rightarrow (450 - 300) = (150 - 100)\, tan^2\theta + 0 \Rightarrow tan^2\theta = 3$$

$$\Rightarrow tan\,\theta = \sqrt{3} \Rightarrow \theta = 60° \Rightarrow 45 + \frac{\phi'}{2} = 60 \Rightarrow \phi' = 30°$$

حال با جایگذاری $tan^2\theta = 3$ در رابطهٔ (۱) خواهیم داشت:

$$300 = 100 \times 3 + 2c' tan\,60 \Rightarrow c' = 0$$

و در ادامه مقدار $\Delta\sigma_d$ در آزمایش CU را به‌دست می‌آوریم:

$$(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)\, tan^2\theta + 2c' tan\theta \quad , \quad \theta = 45 + \frac{\phi'}{2} = 60°$$

$$(200 + \Delta\sigma_d - 50) = (200 - 50) \times tan^2 60 + 0 \Rightarrow \Delta\sigma_d = 300\ kN/m^2$$

تمرین ۱۹: در یک آزمایش سه محوری CU ابتدا، تنش همه جانبهٔ σ_3 بر نمونه وارد شده و سپس با اعمال تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ خاک گسیخته می‌شود. اگر تنش همه جانبه k برابر شده و افزایش یابد، برای دو نوع خاک زیر تنش انحرافی جدید در هنگام گسیختگی، چند برابر تنش انحرافی گسیختگی در آزمایش اول است؟

الف) خاک ماسه‌ای باشد.   ب) خاک چسبنده باشد.

حل:

الف) در خاک ماسه‌ای $c=0$ است، بنابراین رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی در آزمایش CU به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\theta + \boxed{2c\tan\theta} = \sigma_3 \tan^2\theta$$

(چون $c=0$، این عبارت هم صفر است)

از طرفی چون $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d$ است، می‌توان نوشت:

$$\sigma_3 + \Delta\sigma_d = \sigma_3 \tan^2\theta \Rightarrow \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma_3} = \tan^2\theta - 1$$

در ادامه با توجه به اینکه در یک نوع خاک، ϕ و c ثابت هستند و ربطی به بارگذاری ندارند و دانستن این موضوع که $\theta = 45 + \frac{\phi}{2}$ است، می‌توان گفت عبارت $\tan^2\theta - 1$ در سمت راست این تساوی مقداری ثابت بوده و به همین دلیل نسبت $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma_3}$ نیز ثابت خواهد بود. پس اگر تنش σ_3، k برابر شود، $\Delta\sigma_d$ نیز k برابر خواهد شد. توجه کنید که این موضوع، تأثیر محکم شدنِ بیشتر نمونه در مرحلهٔ اول آزمایش را بر روی گسیختگی آن نشان می‌دهد.

$$\frac{\boxed{\Delta\sigma_d}}{\boxed{\sigma_3}} = \boxed{\tan^2\theta - 1}$$

($\Delta\sigma_d$: k برابر — σ_3: k برابر — $\tan^2\theta - 1$: مقدار ثابت)

ب) اگر آزمایش سه محوری CU بر روی یک خاک چسبنده ($c \neq 0$) انجام شود و تنش همه جانبهٔ σ_3، در نمونه k برابر شود، در آن‌صورت تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ کمتر از k برابر خواهد شد، زیرا:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\theta + 2c\tan\theta \Rightarrow \sigma_3 + \Delta\sigma_d = \sigma_3 \tan^2\theta + 2c\tan\theta$$

$$\Rightarrow \Delta\sigma_d = \boxed{\sigma_3}\ \boxed{[\tan^2\theta - 1 + \frac{2c}{\boxed{\sigma_3}\uparrow}\tan\theta]} \Rightarrow$$

با توجه به کاهش عبارت داخل پرانتز، $\Delta\sigma_d$ کمتر از k برابر می‌شود.

(σ_3: k برابر می‌شود. — عبارت داخل کروشه: کاهش می‌یابد)

* به نظر شما این دو نتیجه‌ای که گرفتیم، در آزمایش CD نیز برقرار است؟ (چرا؟)

E-2- بررسی آزمایش سه محوری UU

همانطورکه در قسمت قبل دیدیم، چنانچه شیرهای زهکشی در سراسر آزمایش سه محوری (یعنی مرحلهٔ اول و مرحله دوم) بسته باشند و نمونه در این شرایط بارگذاری و گسیخته شود، در آن‌صورت یک آزمایش تحکیم نیافتهٔ زهکشی نشده (UU) خواهیم داشت.

آزمایش UU بر روی نمونه‌های رسی (معمولاً اشباع) انجام می‌شود و ما در این بخش می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، تأثیر شرایط زهکشی نشده بر رفتار خاک رس را بررسی کنیم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: در آزمایش UU بر روی یک نمونه خاک رس اشباع، چنانچه σ_3 در نمونه‌های بعدی افزایش یابد، در آن‌صورت تنش موثر σ'_3 چه تغییری خواهد کرد؟

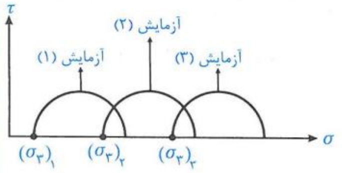
پاسخ: همانطور که می‌دانیم در مرحلهٔ اول آزمایش UU شیرهای زهکشی بسته‌اند و امکان خروج آب وجود ندارد. بنابراین هر چقدر σ_3 اضافه شود، سهمی به دانه‌های جامد نمی‌رسد (σ'_3 تغییر نمی‌کند) و صرفاً فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت، افزایش σ_3 صرف محکم کردن نمونه‌ها و تحکیم آنها نمی‌شود.

برای درک بهتر این موضوع به مثال عددی زیر که مرحلهٔ اول را در دو آزمایش UU با هم مقایسه می‌کند، توجه کنید:

$$\text{آزمایش } UU \Rightarrow \begin{cases} \text{آزمایش اول}: \sigma_3 = 100\,kPa\ ,\ u_f = 60\,kPa \Rightarrow \sigma'_3 = \sigma_3 - u_f = 100 - 60 = 40\,kPa \\ \text{آزمایش دوم}: \sigma_3 = 100 + \boxed{100}\ ,\ u_f = 60 + \boxed{100} \Rightarrow \sigma'_3 = \sigma_3 - u_f = 100 - 60 = 40\,kPa \end{cases}$$

(σ_3 اضافی به آب می‌رسد)

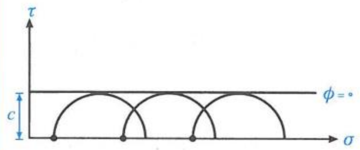
سؤال ۲: اگر آزمایش UU را بر روی نمونه‌های دیگری از خاک، با فشار همه جانبهٔ σ_3 بیشتری انجام دهیم، با توجه به ثابت باقی مانـدن σ'_3، تـنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ در این نمونه‌ها چگونه تغییر می‌کند؟



پاسخ: چون σ'_3 در نمونه‌های بعدی تغییر نمـی‌کنـد، بنـابراین خـاک محکـم‌تـر نمی‌شود و برای گسیخته کردن آن به $\Delta\sigma_d$ بیـشتری نـسبت بـه نمونـهٔ قبلـی‌اش احتیاج نیست. پس در حالت کلی می‌توان گفت در آزمایش UU بر روی یک خاک رس اشباع، $\Delta\sigma_d$ در نمونه‌های مختلف (با σ_3 های متفاوت) یکسان است.

تذکر مهم: ثابت بودن $\Delta\sigma_d$ در نمونه‌های مختلف در آزمایش UU به معنی یکسان بودن قطر دایره‌های مختلف در آزمایش UU است.

سؤال ۳: در آزمایش UU بر روی رس اشباع، ثابت بودن قطر دایره‌های مور به چه معنی است؟



پاسخ: در این حالت خط گسیختگی مور - کولمب، خطی به موازات محـور افقـی (محور σ ها) خواهد بود و این یعنی زاویه اصطکاک داخلـی خـاک در ایـن شـرایط صفر است، زیرا شیب خط صفر است.

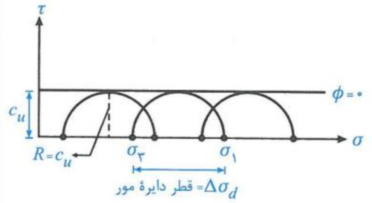
برای تفسیر این موضوع می‌توان گفت، با صفر شدن زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، چسب جدیدی در آن به‌کار می‌افتد کـه همـهٔ مقاومـت خاک را به عهده می‌گیرد. این چسب جدید، **مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک** نامیده می‌شود و آن را با c_u (یا s_u) نشان می‌دهیم:

$$\tau_f = \sigma \tan\phi + c \xrightarrow[c = c_u]{\phi = 0} \tau_f = \sigma \times 0 + c_u = c_u$$

تذکر ۱: صفر بودن زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک در شرایط فوق دلیل بر بدون اصطکاک بودن خاک نیست، بلکه بـه معنـی اشـباع بـودن خاک است. در ادامهٔ این بخش خواهیم دید که اگر خاک رس در شرایط زهکشی نشده به‌صورت اشباع نباشد، ϕ مخالف صفر خواهد بود.

تذکر ۲: خاک رس اشباع در شرایط $\phi = 0$ (شرایط زهکشی نشده) را **خاک رس صرفاً چسبنده** یا **خاک رس کاملاً چسبنده** می‌نامند.

تذکر ۳: با توجه به شکلِ خط گسیختگی مور- کولمب در شرایط $\phi = 0$، می‌توان دید که شعاع هر یک دایره‌های مور برابـر c_u (مقاومـت برشی زهکشی نشده) می‌باشد:



$$c_u = R = \frac{1}{2}\Delta\sigma_d = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

تذکر ۴: در آزمایش UU بر روی رس اشباع، چون $\phi = 0$ است، بنابراین صفحهٔ گسیختگی با امتداد افق زاویهٔ $45°$ می‌سازد:

$$\theta = 45 + \frac{\phi}{2} = 45 + 0 = 45°$$

در ادامه با حل چند تمرین، آزمایش UU را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۲۰: نتایج آزمایش سه محوری بر روی دو نمونه از یک خاک در هنگام گسیختگی، به شرح زیر می‌باشد (σ_d: تنش انحرافـی، σ_3: تـنش همه جانبه):

نمونهٔ اول $\begin{cases} \sigma_3 = \sigma \\ \sigma_d = \sigma \end{cases}$ ، **نمونهٔ دوم** $\begin{cases} \sigma_3 = 2\sigma \\ \sigma_d = \sigma \end{cases}$

نوع خاک و نوع آزمایش به‌ترتیب کدامند؟ (سراسری - ۹۱)

۱) رس اشباع - زهکشی نشده ۲) رس اشباع - زهکشی شده ۳) ماسهٔ اشباع - زهکشی شده ۴) ماسهٔ اشباع - زهکشی نشده

حل: همانطور که مشاهده می‌کنید، در هر دو آزمایش σ_d نمونه‌ها یکسان بوده و افزایش σ_3 نتوانسته باعث محکم‌تـر شـدن نمونـه شـود، بنابراین آزمایش از نوع UU (تحکیم نیافتهٔ زهکشی نشده) می‌باشد. از طرفی گفتیم که آزمایش UU روی خـاک رس انجـام مـی‌شـود و در حالت اشباع، $\phi = 0$ بوده و نتایج فوق به‌دست می‌آید، بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ درست است.

کمی توجه

ماسه‌اشباع عملاً در آزمایش UU از خود مقاومتی نشان نمی‌دهد، زیرا از یک سو عامل ایجاد چسبندگی در آن وجود ندارد و از سوی دیگر، اصطکاک در آزمایش UU از کار می‌افتد.

تمرین ۴۱: در یک آزمایش سه محوری بر روی دو نمونه از یک خاک رس اشباع، در هنگام گسیختگی نتایج زیر به‌دست آمده است:

نمونهٔ اول $\begin{cases}\sigma_3 = 100\ kPa \\ \sigma_1 = 250\ kPa\end{cases}$ ، نمونهٔ دوم $\begin{cases}\sigma_3 = 200\ kPa \\ \sigma_1 = 350\ kPa\end{cases}$

اگر فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی در آزمایش اول برابر $50\ kPa$ باشد، در آن‌صورت مقدار فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی در آزمایش دوم چقدر است؟

● حل: ابتدا دقت شود که در این آزمایش که بر روی رس اشباع انجام شده است، مقدار $\Delta\sigma_d$ در دو نمونه یکسان است، بنابراین آزمایش از نوع UU بوده و می‌توان گفت:

$$\phi = 0\ ,\ c = c_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{250 - 100}{2} = 75\ kPa$$

از سوی دیگر می‌دانیم که در آزمایش UU تنش مؤثر همهٔ نمونه‌ها با هم برابر است (افزایش σ_3، صرف افزایش تنش مؤثر نمی‌شود)، بنابراین می‌نویسیم:

نمونهٔ اول : $\sigma'_3 = \sigma_3 - u_{f_1} = 100 - 50 = 50\ kPa$

نمونهٔ دوم : $\sigma'_3 = \sigma_3 - u_{f_2} \Rightarrow 50 = 200 - u_{f_2} \Rightarrow u_{f_2} = 150\ kPa$

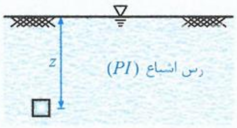
نتیجه: در آزمایش UU میزان افزایش σ_3 نسبت به نمونهٔ قبلی خود، صرف افزایش u_f می‌شود، یعنی می‌توان گفت:

نمونهٔ دوم u_f = نمونهٔ اول u_f + $\Delta\sigma_3$

($\Delta\sigma_3$: افزایش σ_3 در نمونهٔ دوم نسبت به نمونهٔ اول)

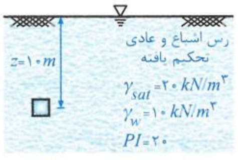
بررسی یک موضوع مهم

برای تعیین مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک رس اشباع (c_u) در عمق مشخصی از یک پروفیل خاک، از رابطهٔ تجربی اسکمپتون به‌صورت زیر استفاده می‌کنیم:



$$\begin{cases}(\frac{c_u}{\sigma'_z})_{NC} = 0/11 + 0/0037\ PI & \text{(رس عادی تحکیم یافته)} \\ (\frac{c_u}{\sigma'_z})_{OC} = (\frac{c_u}{\sigma'_z})_{NC} \times OCR^{0/8} & \text{(رس پیش تحکیم یافته)}\end{cases}$$

دقت شود که در روابط بالا، σ'_z تنش مؤثر قائم در عمق موردنظر است که محاسبهٔ آن را در فصل پنجم یاد گرفتیم.



تمرین ۴۲: یک نمونه از عمق ۱۰ متری پروفیل خاک مقابل به سطح خاک آورده می‌شود و پس از آنکه در دستگاه سه محوری تحت فشار همه جانبهٔ $\sigma_3 = 100\ kN/m^2$ تحکیم پیدا کرد، در شرایط زهکشی نشده، بارگذاری و گسیخته می‌شود. تنش انحرافی لازم برای گسیختگی این نمونه چقدر است؟

● حل: وقتی این نمونه به سطح خاک آورده می‌شود و تحت فشار همه جانبهٔ $\sigma_3 = \sigma'_3 = 100\ kN/m^2$ تحکیم می‌یابد، به این معنی است که خاک به شرایط طبیعی خود برگشته است، زیرا در عمق ۱۰ متری در طبیعت داریم:

$$\sigma'_z = \gamma' z = (20 - 10) \times 10 = 100\ kN/m^2$$

در این شرایط با کمک رابطهٔ تجربی اسکمپتون می‌توان c_u را برای خاک رس عادی تحکیم یافته در عمق موردنظر به‌دست آورد:

$$(\frac{c_u}{\sigma'_z})_{NC} = 0/11 + 0/0037\ PI \Rightarrow (\frac{c_u}{100})_{NC} = 0/11 + 0/0037 \times 20 = 0/184 \Rightarrow c_u = 18/4\ kN/m^2$$

و در نهایت $\Delta\sigma_d$ لازم برای گسیختگی این نمونه برابر است با:

$$\Delta\sigma_d = 2\ c_u = 2 \times 18/4 = 36/8\ kN/m^2$$

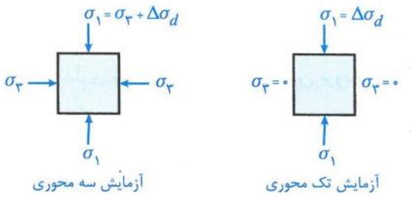
($\Delta\sigma_d$: قطر دایرهٔ مور ، c_u: شعاع دایرهٔ مور)

در ادامه پس از حل این تمرین نسبتاً دشوار، می‌خواهیم شما را با دو موضوع مهم دیگر در این بخش آشنا کنیم:

۱- آزمایش تک محوری UC **۲- بررسی رفتار رس غیراشباع در آزمایش UU**

آزمایش تک محوری UC

اگر آزمایش سه محوری بدون فشار همه جانبه σ_3 $(\sigma_3 = 0)$ و در شرایط زهکشی نشده انجام شود، در آن‌صورت یک **آزمایش تک محوری** خواهیم داشت:



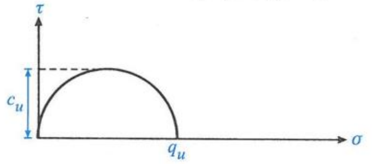
به آزمایش تک محوری، **آزمایش فشاری محدود نشده** و یا به اختصار **آزمایش UC** (*Unconfined Compression Test*) نیز می‌گوییم و همانطورکه ملاحظه می‌کنید، در این آزمایش تنش قائم کل (σ_1) و تنش انحرافی ($\Delta\sigma_d$) با هم برابر هستند. در این شرایط σ_1 را **مقاومت فشاری محدود نشده** یا **مقاومت تک محوری** نامیده و آن را با q_u نشان می‌دهیم که مقدار آن برابر است با:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45 + \frac{\phi}{2}) \xrightarrow[\sigma_1 = q_u]{\sigma_3 = 0} q_u = 0 + 2c\tan(45 + \frac{\phi}{2}) = 2c\tan(45 + \frac{\phi}{2})$$

حال اگر آزمایش UC بر روی رس اشباع در شرایط زهکشی نشده انجام شود ($\phi = 0$ ، $c = c_u$)، خواهیم داشت:

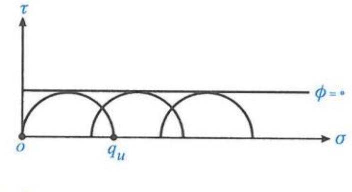
$$\xrightarrow[\phi = 0\ ,\ c = c_u]{\text{رس اشباع}} q_u = 2c_u \tan(45 + 0) \Rightarrow \boxed{q_u = 2c_u}$$

تذکر ۱: در آزمایش تک‌محوری تنها یک دایرۀ مور داریم و عملاً نمی‌توان برای این آزمایش خط گسیختگی رسم کرد:

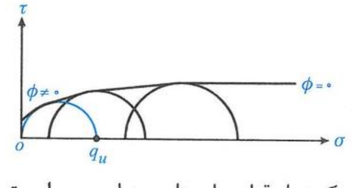


تذکر ۲: اگر شروع آزمایش سه محوری UU با یک آزمایش تک محوری باشد، در آن‌صورت خط گسیختگی به‌صورت زیر خواهد بود:

الف) رس اشباع بدون ترک



ب) رس ترک‌دار



همانطورکه ملاحظه می‌کنید در حالت رس ترک‌دار، قطر دایرۀ مور در آزمایش تک محوری کمی کمتر از قطر سایر دایره‌های مور است و همین موضوع باعث شده است که در ابتدای خط گسیختگی، $\phi \neq 0$ باشد. دلیل این موضوع آن است که به‌هنگام نمونه‌گیری از خاک رسِ ترک‌دار و برداشته شدن فشار جانبی از روی آن، این ترک‌ها باز می‌شوند و چون در شروع آزمایش، فشار σ_3 نیز وارد نمی‌شود، بنابراین نمونه با این ترک‌ها بارگذاری و گسیخته می‌شود و طبیعی است که نسبت به حالت وجود σ_3، مقاومت کمتری از خود نشان داده و قطر دایره مور ($\Delta\sigma_d$) کوچکتر باشد. همانطور که در شکل مشخص است، با اعمال تنش محدودکننده σ_3 در نمونه‌های بعدی، ترک‌ها در ابتدای آزمایش بسته می‌شوند و مقاومت خاک بیشتر خواهد شد، در نتیجه قطر دایره مور کمی بزرگتر می‌شود.

در بسیاری از خاک‌های رسی دیده شده است که مقاومت فشاری محدود نشده (q_u) آنها بعد از به‌هم خوردگی نمونه، بدون هیچ تغییری در مقدار رطوبت، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. این خاصیت خاک‌های رسی را **حساسیت** می‌نامند. **درجهٔ حساسیت** را می‌توان به‌صورت نسبت مقاومت فشاری محدود نشده در حالت دست‌نخورده و دست‌خورده، به شکل زیر تعریف کرد:

$$s_t = \frac{q_{u\ \text{دست‌نخورده}}}{q_{u\ \text{دست‌خورده}}}$$

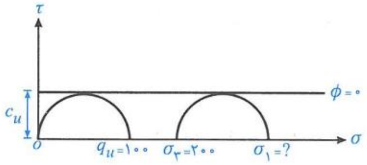
علت حساسیت خاک‌های رسی آن است که بهم‌خوردگی نمونه سبب می‌شود تا بافت طبیعی یا استخوان‌بندی ذرات که طی عمل رسوب‌گذاری به‌وجود آمده است، ازبین برود. حال اگر نمونه مدتی به حال خود گذاشته شود، با گذشت زمان مجدداً مقاومت از دست‌رفته را کسب می‌کند که به این پدیدهٔ جالب **«تیکسوتروپی»** می‌گویند.

باتوجه به درجه حساسیت در خاکهای رسی، می‌توان آنها را به‌شرح جدول زیر طبقه‌بندی کرد:

$s_t > ۸$	$۴ < s_t < ۸$	$۲ < s_t < ۴$	$۱ < s_t < ۲$
فوق‌العاده حساس	حساسیت زیاد	حساس	حساسیت کم

تمرین ۴۳: در یک آزمایش تک محوری روی رس اشباع بدون ترک، مقاومت فشاری محدود نشده برابر $۱۰۰\ kPa$ به‌دست آمده است. اولاً مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک را به‌دست آورید، ثانیاً تنش قائم کل به ازای فشار همه جانبه $۲۰۰\ kPa$ در آزمایش UU بر روی همین خاک را محاسبه کنید.

● پاسخ: ابتدا برای درک بهتر شما، دوایر مور و خط گسیختگی در شرایط فوق را رسم می‌کنیم:



حال با توجه به شکل ترسیم شده، می‌نویسیم:

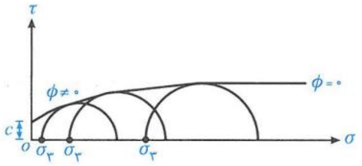
$$c_u = R = \frac{۱}{۲} q_u = \frac{۱}{۲} \times ۱۰۰ = ۵۰\ kN/m^۲$$

$$\sigma_۱ = \sigma_۳ + \Delta\sigma_d = ۲۰۰ + ۱۰۰ = ۳۰۰\ kN/m^۲$$

$\Delta\sigma_d \rightarrow q_u = ۱۰۰$

بررسی رفتار رس غیر اشباع در آزمایش UU

در ابتدای این بخش دیدیم که خط گسیختگی در آزمایش UU بر روی رس اشباع به‌صورت افقی است و به همین دلیل $\phi = ۰$ می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در انجام آزمایش UU بر روی نمونه‌های رس غیراشباع، نمودار خط گسیختگی به‌صورت زیر خواهد بود:



در توضیح شکلِ نمودار فوق، به موارد زیر توجه کنید:

۱) در حالت غیراشباع اگر به‌طور مثال تنش همه جانبه $\sigma_۳$ از ۱۰۰ کیلوپاسکال به ۲۰۰ کیلوپاسکال برسد، تمام این افزایش $\sigma_۳$ $(۱۰۰ = ۱۰۰ - ۲۰۰)$ به آب حفره‌ای نمی‌رسد، به‌طوری‌که مثلاً ۷۰ کیلوپاسکال از آن به آب حفره‌ای رسیده و u_f را زیاد می‌کند.

۲) ممکن است از خود بپرسید که ۳۰ کیلوپاسکال باقی‌مانده ناشی از افزایش $\sigma_۳$ $(۳۰ = ۷۰ - ۱۰۰)$ کجاست که در جواب باید بگوییم، هوای موجود در خاک این ۳۰ کیلوپاسکال را می‌گیرد و با تراکم خود، آن را به دانه‌های جامد داده و باعث افزایش تنش مؤثر $\sigma'_۳$ در خاک و کمی تحکیم آن می‌شود.

$\Delta\sigma_۳ =$ افزایش فشار آب حفره‌ای + افزایش فشار هوای حفره‌ای

افزایش فشار هوای حفره‌ای ← افزایش تنش مؤثر $\sigma'_۳$ ⇐ کمی تحکیم ایجاد می‌کند.

۳) وقتی تنش مؤثر σ'_3 افزایش پیدا کرده و خاک کمی تحکیم پیدا می‌کند، برای گسیخته کردن خاک در نمونه‌های بعدی، $\Delta\sigma_d$ بیشتری نیاز است بدین ترتیب ضمن افزایش σ_3، قطر دایره‌های مور (که همان $\Delta\sigma_d$ است) زیادتر شده و دایره‌های مور بزرگتر می‌شوند. از این‌رو خط گسیختگی دیگر به شکل یک خط افقی نبوده و همین باعث می‌شود تا دیگر ϕ مساوی صفر نباشد.

۴) این روند افزایش جزئی $\Delta\sigma_d$ و صفر نبودن ϕ تا جایی ادامه می‌یابد که بالاخره σ_3های زیاد باعث ترکیدن حباب‌های هوا می‌شوند. در این شرایط **هوا به‌صورت محلول در آب در می‌آید** و خاک اشباع می‌شود. پس خط گسیختگی افقی شده و سرانجام $\phi = 0$ خواهد شد.

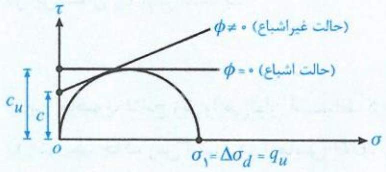
بررسی یک موضوع پرکاربرد در کنکور

مقاومت تک محوری خاک رس در شرایط غیراشباع را می‌توان مشابه با مطالبی که قبلاً خواندیم، به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$q_u = 2c\tan(45 + \frac{\phi}{2})$$

حال اگر از ما بپرسند که مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک (c_u) در این شرایط چقدر است، در پاسخ باید بگوییم که مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ c_u فقط مربوط به حالت اشباع می‌باشد، اما ما می‌توانیم تصور کنیم که خاک غیراشباعِ ما اشباع شده است و دارای c_u می‌باشد. با این تصور، c_u فرضی این خاک برابر است با:

$$c_u = \frac{1}{2}q_u = c\tan(45 + \frac{\phi}{2})$$



با توجه به نمودار بالا، واضح است که $c < c_u$ بوده و این یعنی در حالت غیراشباع، چسبندگی خاک رس کمتر از مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ حالت اشباع آن است.

در ادامه با بررسی تست‌های مطرح شده از این موضوع در آزمون کارشناسی ارشد، به اهمیت این بحث در کنکور بیشتر پی خواهید برد.

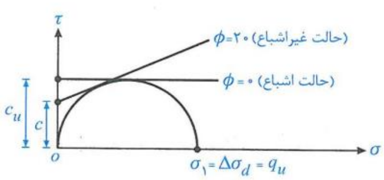
تمرین ۲۴: در یک آزمایش تک‌محوری (فشاری محدود نشده) برروی یک نمونه رس غیراشباع، پارامترهای مقاومت برشی به‌صورت $c = 0/25\,kg/cm^2$ و $\phi = 20^\circ$ به‌دست آمده است. درصورت انجام این آزمایش برروی نمونهٔ اشباع از همین خاک، کدام‌یک از مقادیر زیر برای c و ϕ محتمل خواهد بود؟ (سراسری - ۸۵)

۱) $c = 0/45\,kg/cm^2$, $\phi = 10^\circ$
۲) $c = 0/15\,kg/cm^2$, $\phi = 10^\circ$
۳) $c = 0/45\,kg/cm^2$, $\phi = 0$
۴) $c = 0/15\,kg/cm^2$, $\phi = 0$

حل: با ترسیم دایرهٔ مور برای نمونه‌های بعدی و تعمیم آزمایش تک محوری به آزمایش UU، ترسیم دایرهٔ مور، برای حالت‌های اشباع و غیر اشباع به‌صورت زیر خواهد بود که با توجه به آن می‌توان گفت:

۱- در حالت اشباع، $\phi = 0$ خواهد شد (گزینه‌های ۱ و ۲ غلط هستند)

۲- در حالت اشباع، چسبندگی برابر c_u می‌شود که از چسبندگی c که مربوط به حالت غیراشباع است، بیشتر می‌باشد ($c_u > c = 0/25\,kg/cm^2$ و گزینهٔ ۴ غلط است)



از جمع‌بندی این دو موضوع، می‌توان فهمید که گزینهٔ (۳) می‌تواند صحیح باشد.

تمرین ۲۵: در یک آزمایش برش مستقیم روی خاک، نمونهٔ اول تحت تنش قائم $1\,kg/cm^2$ و تنش برشی $0/8\,kg/cm^2$ و نمونهٔ دوم تحت تنش قائم $1/5\,kg/cm^2$ و تنش برشی $1\,kg/cm^2$ گسیخته می‌گردند. اگر بدانیم نتایج حاصل از این آزمایش در تعیین پارامترهای مقاومت برشی با نتایج آزمایش تک‌محوری روی یک خاک کاملاً تطابق دارد، مقدار مقاومت تک‌محوری (q_u) این خاک چه میزان است؟ ($q_u = 2c_u$، $\tan 56^\circ = 1/5$ و $\tan 22^\circ = 0/4$) (سراسری - ۸۴)

۱) ۰/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع
۲) ۰/۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع
۳) ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع
۴) ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع

● پاسخ: ابتدا با کمک آزمایش برش مستقیم، پارامترهای مقاومت برشی خاک موردنظر را می‌یابیم:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c \begin{cases} \text{نمونهٔ اول} : ۰/۸ = ۱\times \tan\phi + c & (۱) \\ \text{نمونهٔ دوم} : ۱ = ۱/۵\times \tan\phi + c & (۲) \end{cases}$$

رابطهٔ (۲) − رابطهٔ (۱) $\Rightarrow (۱-۰/۸) = (۱/۵-۱)\tan\phi + ۰ \Rightarrow \tan\phi = ۰/۴ \xrightarrow{\text{اطلاعات صورت سؤال}} \phi = ۲۲^\circ$

رابطهٔ (۱): $۰/۸ = ۱\times ۰/۴ + c \Rightarrow c = ۰/۴\ kg/cm^۲$

از سوی دیگر طبق صورت سؤال، نتایج آزمایش برش مستقیم با نتایج آزمایش تک محوری روی این خاک مطابقت دارد و این یعنی، پارامترهای ϕ و c در هر دو آزمایش یکسان است، از این‌رو می‌نویسیم:

تک محوری: $q_u = ۲c\tan(۴۵+\frac{\phi}{۲}) = ۲\times ۰/۴\times \tan(۴۵+\frac{۲۲}{۲}) = ۱/۲\ kg/cm^۲$

$\tan ۵۶^\circ = ۱/۵$

بنابراین گزینهٔ (۴) درست است.

کمی توجه

در این سؤال c_u برابر است با:

$$c_u = \frac{۱}{۲}q_u = \frac{۱}{۲}\times ۱/۲ = ۰/۶\ kg/cm^۲ > c = ۰/۴\ kg/cm^۲$$

از این موضوع، نتایج زیر را می‌توان استنباط کرد:

۱) در یک خاک رس اشباع در آزمایش UU، $q_u = ۲c_u$ می‌باشد.

۲) در یک خاک رس غیراشباع در آزمایش UU، $q_u = ۲c$ نمی‌باشد بلکه برابر $۲c\tan(۴۵+\frac{\phi}{۲})$ است.

۳) در یک خاک رس غیراشباع در آزمایش UU، اگر به‌طور فرضی چسبندگی خاک به c_u رسیده و $\phi = ۰$ شود، بین c_u و q_u، رابطهٔ $q_u = ۲c_u$ برقرار است.

تمرین ۴۶: نمونه‌ای از یک نوع خاک به‌ترتیب با قطر و ارتفاع ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفته است. تنش محوری در لحظه شکست معادل $۲\sqrt{۳}\ kg/cm^۲$ می‌باشد و خط شکست با امتداد قائم زاویه ۳۰ درجه می‌سازد. مقادیر چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) عبارتند از: (سراسری – ۸۷)

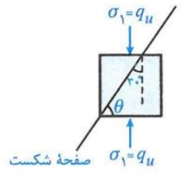
۱) $\phi = ۰ , c = ۱\ kg/cm^۲$

۲) $\phi = ۳۰^\circ , c = ۱\ kg/cm^۲$

۳) $\phi = ۰ , c = \sqrt{۳}\ kg/cm^۲$

۴) $\phi = ۳۰^\circ , c = \sqrt{۳}\ kg/cm^۲$

● پاسخ: در آزمایش موردنظر زاویه خط شکست با امتداد قائم ۳۰° است، بنابراین مقدار θ برابر است با:



$$\theta = ۹۰^\circ - ۳۰^\circ = ۶۰^\circ$$

و از آنجا زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک را می‌یابیم:

$$\theta = ۴۵ + \frac{\phi}{۲} \Rightarrow ۶۰ = ۴۵ + \frac{\phi}{۲} \Rightarrow \phi = ۳۰^\circ$$

و در ادامه می‌توان نوشت:

$$q_u = ۲c\tan(۴۵+\frac{\phi}{۲}) \Rightarrow ۲\sqrt{۳} = ۲c\times \tan(۴۵+\frac{۳۰}{۲}) \Rightarrow c = ۱\ kg/cm^۲$$

بنابراین گزینهٔ (۲) صحیح است.

کمی توجه

اگر در این سؤال مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک (c_u) را از ما بخواهند، در آن‌صورت می‌توان گفت:

$$c_u = \frac{۱}{۲}q_u = \frac{۱}{۲}\times ۲\sqrt{۳} = \sqrt{۳} > c = ۱\ kg/cm^۲$$

E-۳- نمودار رفتار خاک‌ها در آزمایش‌های CD و CU

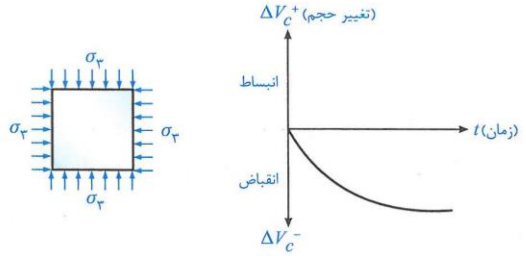
در انجام آزمایش‌های سه محوری CD و CU، یکی از موضوعات مورد توجه ما، بررسی نحوهٔ تغییرات حجم نمونه، اضافه فشار آب حفره‌ای و تنش انحرافی آن در حین آزمایش است که با ترسیم نمودار به آن می‌پردازیم.

در ادامه ابتدا نمودارهای مشترک و یکسان در این دو آزمایش را بررسی می‌کنیم و سپس نمودارهایی را که در این دو آزمایش متفاوت است مورد توجه قرار می‌دهیم.

نمودارهای مشترک در آزمایش‌های CD و CU

۱- نمودار تغییرات حجم در مرحلهٔ اول آزمایش

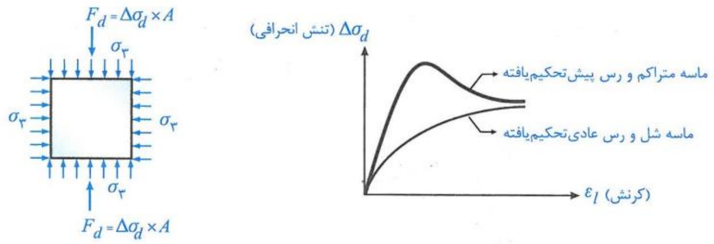
در مرحلهٔ اول آزمایش‌های CD و CU، پس از اعمال فشار همه جانبهٔ $\sigma_۳$، شیرهای زهکشی باز می‌شوند و همزمان با تحکیم نمونه، خاک کاهش حجم می‌دهد. در انتها نیز با خاتمه یافتن تحکیم، روند کاهش حجم نمونه متوقف می‌شود. پس نمودار تغییرات حجم نمونه در مرحله اول ΔV_c (c حرف اول *consolidation* به معنی تحکیم می‌باشد) در برابر زمان t (*time*) به‌صورت مقابل خواهد بود.



تذکر: اگر فشار همه جانبهٔ $\sigma_۳$ کم باشد، در آن‌صورت $\Delta V_c \simeq ۰$ خواهد بود.

۲- نمودار تغییرات تنش انحرافی در مرحلهٔ دوم آزمایش

در مرحلهٔ دوم آزمایش‌های CD و CU، با اعمال تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$، نمونه گسیخته می‌شود. صرف‌نظر از شرایط زهکشی نمونه و نوع آزمایش، نمودار تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ (d حرف *deviatoric* به معنی انحرافی است) وارد به نمونه در برابر کرنش طولی آن (ε_l) برای دو گروه خاک، یکی ماسه متراکم و رس پیش‌تحکیم یافته و دیگری ماسه شل و رس عادی تحکیم یافته، به‌صورت نمودارهای نشان داده شده در شکل زیر است:



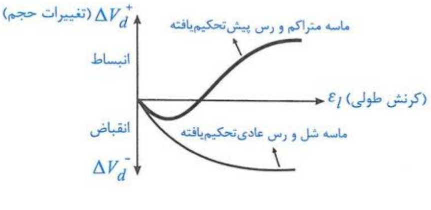
توجه: در نمودارهایی که در ادامه رسم خواهیم کرد این اتفاق مجدداً تکرار می‌شود، یعنی نمودار ماسهٔ متراکم و رس پیش‌تحکیم یافته مشابه هم بوده و نمودارهای ماسهٔ شل و رس عادی تحکیم یافته نیز مثل هم است.

نمودارهای متفاوت در آزمایش‌های CD و CU

۱- نمودار تغییرات حجم در مرحلهٔ دوم آزمایش *CD*

در ابتدا به این موضوع دقت کنید که در مرحله دوم آزمایش CD شیرهای زهکشی باز می‌باشند، در حالیکه در مرحله دوم آزمایش CU شیرهای زهکشی بسته هستند. بنابراین نمونهٔ خاک در مرحله دوم آزمایش CU تغییر حجم نداده (چون آبی از نمونه خارج نمی‌شود) و عملاً ترسیم نمودار تغییرات حجم برای آن بی‌معنی است.

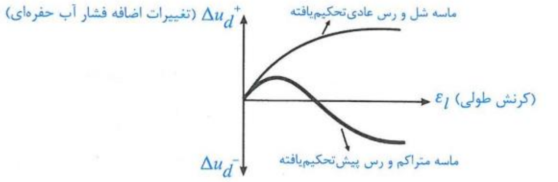
از طرفی در آزمایش CD با توجه به نوع خاک، با دو رفتار متفاوت مواجهیم که براساس آن می‌توان نمودار تغییرات حجم در مرحلهٔ دوم آزمایش CD (ΔV_d) در برابر کرنش طولی (ε_l) را به‌صورت مقابل نشان داد:



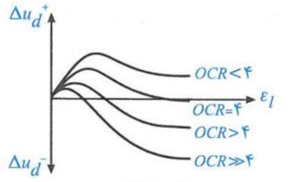
۲- نمودار تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در مرحله دوم آزمایش CU

می‌دانیم در مرحله دوم آزمایش CD شیرهای زهکشی باز هستند و سرعت بارگذاری نیز به‌گونه‌ای می‌باشد که نمونه زهکشی شده و اضافه فشار آب حفره‌ای آن در سراسر مرحلهٔ دوم صفر است. بنابراین رسم نمودار تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای برای آن بی‌معنی است.

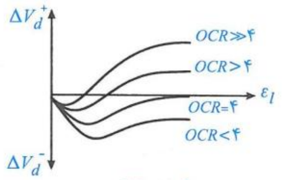
اما در آزمایش CU، با توجه به نوع خاک، با دو رفتار متفاوت مواجه هستیم که براساس آن می‌توان نمودار تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در مرحلهٔ دوم آزمایش CU (Δu_d) در برابر کرنش طولی (ε_l) را به‌صورت زیر نشان داد:



تذکر۱: هر چه نسبت پیش تحکیمی (یعنی OCR) در خاک‌های رسی بیشتر باشد، افزایش حجم آنها در لحظهٔ گسیختگی در آزمایش CD و کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای آنها در لحظهٔ گسیختگی در آزمایش CU نیز بیشتر خواهد بود. برای درک بهتر این موضوع به نمودارهای زیر دقت کنید:

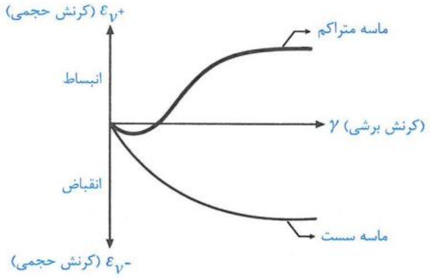


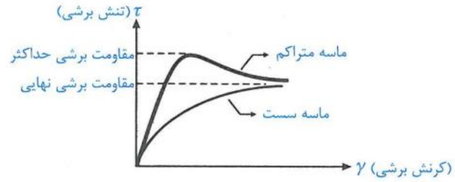
آزمایش CU



آزمایش CD

تذکر۲: نمودار تغییرات حجم خاک‌ها در آزمایش برش مستقیم مثل نمودار تغییرات حجم خاک‌ها در مرحله دوم آزمایش سه محوری CD است. در ضمن نمودار تنش - کرنش یک نمونه خاک در آزمایش برش مستقیم نیز مشابه نمودار تنش - کرنش خاک در مرحله دوم آزمایش‌های سه محوری CD و CU است.



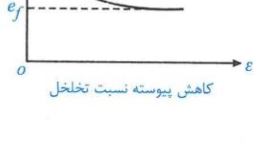


همانطورکه ملاحظه می‌کنید در نمودارهای آزمایش برش مستقیم محور افقی به‌جای کرنش طولی (ε_l) به‌صورت کرنش برشی (γ) است و به‌جای تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ و تغییرات حجم ΔV_d به‌ترتیب τ و ε_v به‌کار می‌رود.

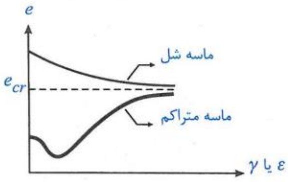
تذکر۳: با استفاده از نمودار مربوط به تغییرات حجم یک نمونه، می‌توان نمودار تغییرات نسبت تخلخل آن را نیز ترسیم کرد، زیرا تغییرات نسبت تخلخل خاک با تغییرات حجم آن متناسب است. به‌عنوان مثال در مرحلهٔ دوم یک آزمایش سه محوری CD بر روی رس عادی تحکیم‌یافته، نمودار تغییرات نسبت تخلخل به‌صورت زیر خواهد بود:

کاهش پیوستهٔ حجم

$\Longrightarrow$



کاهش پیوسته نسبت تخلخل



تذکر ۴: اگر حجم یک نمونه ماسه‌ای درضمن انجام آزمایش برش مستقیم یا مرحله دوم سه‌محوری تغییر نکند (هنگام گسیختگی)، در آن‌صورت نشانهٔ خلاء نمونه در این حجم را **نشانه خلاء بحرانی** (e_{cr}) می‌نامند. برای خاک ماسه‌ای در دو حالت شل و متراکم که شرایط بارگذاری اولیه یکسانی دارند، نشانهٔ خلاء بحرانی یکسان است.

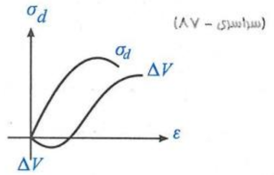
در ادامه با بررسی چند تمرین متنوع، با سؤالات این بخش آشنا می‌شویم.

تمرین ۴۷: نمونه‌ای از خاک رس پیش‌تحکیم‌یافته اشباع با درجه پیش‌تحکیمی ۴ ($OCR = ۴$) تحت آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی شده (CD) قرار گرفته است. این نمونه خاک چه رفتاری در حین مرحله دوم آزمایش (اعمال تنش انحرافی) از خود نشان می‌دهد؟ (سراسری - ۸۵)

۱) ابتدا افزایش حجم و بعد کاهش حجم
۲) ابتدا کاهش حجم و سپس افزایش حجم
۳) ابتدا افزایش و بعد کاهش فشار آب حفره‌ای
۴) ابتدا کاهش و بعد افزایش فشار آب حفره‌ای

حل: در مرحلهٔ دوم آزمایش CD، اضافه فشار آب حفره‌ای در سراسر این مرحله صفر است و نموداری برای Δu_d نداریم، بنابراین گزینه‌های (۳) و (۴) نادرست هستند. از طرفی در ابتدای مرحله دوم آزمایش CD، همه نمونه‌ها با کاهش حجم مواجه می‌شوند. بنابراین گزینهٔ (۱) نیز نادرست است و تنها گزینهٔ باقی‌مانده، گزینه (۲) است که پاسخ صحیح این تست می‌باشد. صحت گزینهٔ (۲) را می‌توانید در نمودار ارائه شده در متن درس نیز مشاهده کنید. (نمودار تغییرات حجم در مرحلهٔ دوم آزمایش CD، برای نمونهٔ رس پیش تحکیم یافته را ببینید)

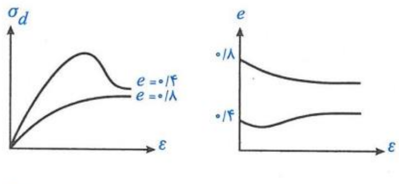
تمرین ۴۸: منحنی تغییرات تنش انحرافی (σ_d) و تغییرحجم نمونه (ΔV) برحسب کرنش محوری در یک آزمایش سه‌محوری برروی یک نمونه خاک رس به‌صورت مقابل است. این نوع رفتار معمولاً در کدام‌یک از حالت‌های زیر مشاهده می‌شود؟ (سراسری - ۸۷)

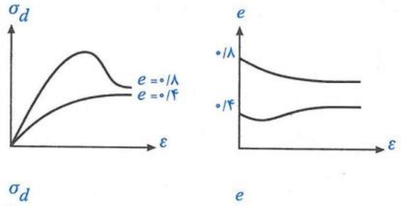


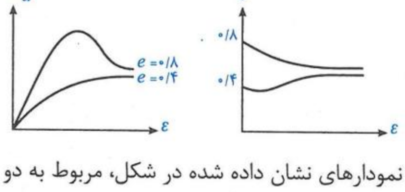
۱) در آزمایش CU روی رس عادی‌تحکیم‌یافته (NC)
۲) در آزمایش CU روی رس پیش‌تحکیم‌یافته (OC)
۳) در آزمایش CD روی رس عادی‌تحکیم‌یافته (NC)
۴) در آزمایش CD روی رس پیش‌تحکیم‌یافته (OC)

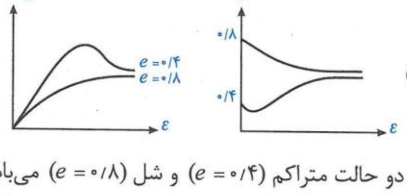
حل: در نمودار داده شده در صورت سؤال، تغییرات حجم داده شده است، بنابراین آزمایش نمی‌تواند CU باشد (در مرحلهٔ دوم آزمایش CU شیرهای زهکشی بسته بوده و تغییرات حجم نداریم.) و گزینه‌های (۱) و (۲) حذف می‌شوند. از طرف دیگر حجم نمونه در مرحلهٔ دوم (به محور افقی که ε است دقت کنید) ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است، بنابراین نمونهٔ مورد‌نظر، رس پیش‌تحکیم یافته بوده و گزینهٔ (۴) پاسخ این تست است.

تمرین ۴۹: یک نمونه خاک ماسه‌ای خشک در دو نسبت تخلخل $e = ۰/۴$ و $e = ۰/۸$ تحت آزمایش سه‌محوری قرار گرفته است. کدام‌یک از منحنی‌های زیر می‌تواند نتایج را برای این دو خاک بیان نماید؟ (σ_d = تنش انحرافی و ε = کرنش محوری) (سراسری - ۸۵)

(۱


(۲


(۳


(۴


حل: نمودارهای نشان داده شده در شکل، مربوط به دو نمونهٔ ماسه‌ای در دو حالت متراکم ($e = ۰/۴$) و شل ($e = ۰/۸$) می‌باشند که باید در نشانهٔ خلاء بحرانی (e_{cr}) به گسیختگی برسند. وجود نشانهٔ خلاء بحرانی را می‌توانید در گزینه‌های (۳) و (۴) مشاهده کنید، بنابراین گزینه‌های (۱) و (۲) حذف می‌شوند. از طرف دیگر نمودار تنش انحرافی - کرنش در ماسهٔ متراکم با e کمتر، در بالای منحنی تنش - کرنش ماسهٔ شل با e بیشتر قرار می‌گیرد. بنابراین از بین گزینه‌های (۳) و (۴) نیز گزینهٔ (۳) حذف شده و گزینهٔ درست که پاسخ این تست است، گزینهٔ (۴) خواهد بود.

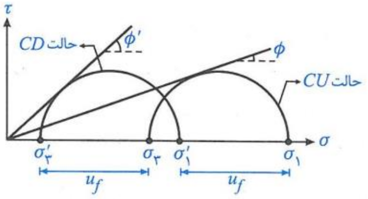
تمرین ۳۰: کدام‌یک از عبارت‌های زیر در مورد یک خاک رس عادی تحکیم یافته در آزمایش CU درست است؟

۱) زاویهٔ اصطکاک داخلی در حالت تنش مؤثر با زاویهٔ اصطکاک داخلی در حالت تنش کل برابر است.

۲) زاویهٔ اصطکاک داخلی در حالت تنش مؤثر کوچکتر از زاویهٔ اصطکاک داخلی در حالت تنش کل است.

۳) زاویهٔ اصطکاک داخلی در حالت تنش مؤثر بزرگتر از زاویهٔ اصطکاک داخلی در حالت تنش کل است.

۴) به‌طور دقیق نمی‌توان اظهارنظر کرد و هر یک از سه حالت فوق ممکن است اتفاق بیافتد.



حل: با توجه به مطالب خوانده شده، برای رس عادی تحکیم یافته، در پایان آزمایش CU تغییرات فشار آب حفره‌ای مثبت است. از طرفی در رس عادی تحکیم یافته، $c = c' = 0$ است پس خط گسیختگی را برای دو حالت تنش مؤثر و تنش کل در یک خاک رس عادی تحکیم یافته می‌توان به‌صورت مقابل ترسیم نمود (دقت کنید که چون $u_f > 0$ است، با تبدیل شرایط تنش کل به تنش موثر، دایره مور به سمت چپ جابه‌جا می‌شود)

با توجه به شکل‌های فوق، $\phi < \phi'$ می‌باشد و گزینهٔ (۳) درست است.

E-۴- کاربردهای عملی آزمایش‌های سه محوری

از قسمت اول فصل به‌خاطر داریم که برای محاسبهٔ مقاومت برشی خاک در یک امتداد مشخص، باید پارامترهای مقاومت برشی خاک معلوم باشند. از طرف دیگر در قسمت‌های بعدی فصل، بحث حاکمیت تنش کل و تنش مؤثر را یاد گرفتیم و دیدیم که پارامترهای مقاومت برشی در حالت کلی می‌توانند به یکی از سه شکل زیر استفاده شوند:

۱- پارامترهای مؤثر مقاومت برشی (ϕ', c')

۲- پارامترهای مقاومت برشی مربوط به حالت تنش کل (ϕ, c)

۳- پارامترهای مقاومت برشی مربوط به حالت زهکشی نشده در رس صرفاً چسبنده ($\phi = 0, c_u$)

با توجه به مطالب فوق، محاسبهٔ مقاومت برشی خاک براساس رابطهٔ مور- کولمب به یکی از سه صورت زیر خواهد بود:

$$\tau_f \Rightarrow \begin{cases} \tau_f = \sigma' \tan\phi' + c' \\ \tau_f = \sigma \tan\phi + c \\ \tau_f = c_u \end{cases}$$

حال ممکن است از خود بپرسید که کدام‌یک از سه رابطهٔ فوق را باید برای محاسبهٔ مقاومت برشی خاک در شرایط عملی به‌کار برد؟

در جواب باید بگوییم در یک پروژهٔ عملی، با توجه به نوع پروژه و شرایط بارگذاری موجود در آن، تصمیم می‌گیریم که از کدام پارامترها استفاده کنیم. برای درک بهتر این موضوع، به موارد زیر توجه کنید:

۱) در خاک‌های ماسه‌ای و خاک رس اشباع که در طبیعت تحت اثر وزن خود به‌صورت عادی تحکیم یافته‌اند و همچنین خاک‌های رسی اشباع و دست‌ساز (مثل خاکریز یا شیروانی خاکی که توسط انسان ساخته می‌شوند) که مدت مدیدی از ساختشان می‌گذرد، باید از آزمایشی استفاده شود که خاک در آن تحکیم یافته است (مرحلهٔ اول آن تحکیم یافته است) یعنی آزمایش‌های CD یا CU.

الف) اگر بارگذاری روی خاک سریع باشد (مثل زلزله یا گسیختگی در اثر لغزش ناگهانی یک شیروانی خاکی)، در آن‌صورت خاک فرصت زهکشی و صفر کردن اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده را ندارد و خاک در شرایط زهکشی نشده گسیخته می‌شود. در این حالت باید از آزمایش CU استفاده کنیم.

ب) اگر بارگذاری تدریجی و آرام باشد (مثل گسیختگی در اثر لغزش تدریجی یک شیروانی خاکی یا ساخت یک بنا در مدت زمان چند سال) در آن‌صورت خاک فرصت زهکشی و صفر کردن اضافه فشار آب حفره‌ای خود را دارد و در شرایط زهکشی شده گسیخته می‌شود. پس در این حالت باید از آزمایش CD استفاده کرد.

۲) در خاک رس اشباع و دست‌ساز، بلافاصله بعد از ساخت یا در حین ساخت، فرصتی برای تحکیم وجود ندارد و عملاً خاک قوی و محکم نشده است. بنابراین ممکن است دچار لغزش ناگهانی و فرو ریزش گردد. از این‌رو ما با شرایط تحکیم نیافتهٔ زهکشی نشده مواجه هستیم و باید از آزمایش UU استفاده کنیم.

تذکر: اگر خاک‌های ماسه‌ای ریز تحت بار ناشی از زلزله قرار بگیرند، به علت سرعت بسیار بالای این بارگذاری، فرصت زهکشی و صفر کردن اضافه فشار آب حفره‌ای را ندارند. در این حالت ممکن است، تنش مؤثر خاک صفر شده و خاک دچار جوشش (روانگرایی) شود.

در ادامه با حل چند تمرین، با کاربردهای عملی آزمایش‌های سه محوری بیشتر آشنا می‌شویم.

تمرین ۳۱: به‌منظور بررسی پایداری شیروانی‌های سدهای خاکی در پایان ساخت، از ضرایب مقاومت برشی تحت شرایط .... استفاده می‌گردد. (سراسری - ۸۳)

۱) تک‌محوری
۲) تحکیم‌یافته - زهکشی شده (CD)
۳) تحکیم‌یافته - زهکشی نشده (CU)
۴) تحکیم‌نیافته - زهکشی نشده (UU)

● حل: در این سؤال، پایداری شیروانی سد خاکی در پایان ساخت مطرح شده است که در مورد آن می‌توان گفت:

شیروانی سد خاکی، یک رس اشباع دست‌ساز است که در پایان ساخت یا به تعبیر صحیح‌تر، بلافاصله بعد از ساخت مورد توجه این سؤال قرار گرفته است. بنابراین هنوز تحت اثر وزن خود تحکیم نیافته است (U) و ضعیف می‌باشد، در این حالت احتمال دارد که به‌طور ناگهانی بلغزد و فرصت زهکشی در خاک ایجاد نشود (U). از این‌رو برای تحلیل شیروانی باید از ضرایب مقاومت برشی تحت شرایط UU استفاده شود و گزینهٔ (۴) درست است.

تمرین ۳۲: یک سد خاکی در منطقه‌ای زلزله‌خیز اجرا شده است. اگر ۱۰ سال بعد از بهره‌برداری احتمال وقوع زلزله طراحی برود، به منظور بررسی پایداری شیروانی‌های این سد خاکی، پارامترهای مقاومت برشی بر اساس نتایج کدام آزمایش باید مورد استفاده قرار گیرد؟ (سراسری - ۸۸)

۱) آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکش‌نشده (CU)
۲) آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته - زهکشی‌شده (CD)
۳) آزمایش سه‌محوری تحکیم‌نیافته - زهکشی‌نشده (UU)
۴) آزمایش سه‌محوری معمولی برروی نمونه‌های غیراشباع

● حل: ده سال پس از بهره‌برداری، مدت زیادی است که از ساخت سد خاکی گذشته است و هستهٔ رسی آن تحت اثر وزن خود به‌طور کامل تحکیم یافته است. از طرفی وقوع زلزله مثل یک بارگذاری سریع است که خاک در هنگام اعمال آن، فرصت زهکشی و صفر کردن اضافه فشار آب حفره‌ای خود را ندارد.

بنابراین برای به‌دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی متناسب با این وضعیت، از آزمایش تحکیم‌یافتهٔ زهکشی نشده یا همان CU استفاده می‌کنیم، یعنی گزینه (۱) پاسخ صحیح این تست می‌باشد.

تمرین ۳۳: در یک مصالح رس اشباع عملیات خاکبرداری انجام شده است. نمونه‌ای از این مصالح که رس عادی تحکیم‌یافته $(OCR = 1)$ است، در آزمایشگاه تحت آزمایش تحکیم‌یافتهٔ زهکشی نشده (CU) قرار گرفته است. در لحظه گسیختگی فشار جانبی برابر $60\,kN/m^2$، تفاوت تنش برابر $80\,kN/m^2$ و فشار آب حفره‌ای $20\,kN/m^2$ بوده‌اند. برای بررسی پایداری بلندمدت شیروانی حاصل از خاکبرداری، زاویه اصطکاک داخلی خاک باید چه مقدار انتخاب شود؟ (سراسری - ۸۳)

۱) 20°
۲) 25°
۳) 30°
۴) 35°

● حل: برای بررسی پایداری بلند مدت شیروانی حاصل از خاکبرداری، باید از پارامترهای مؤثر مقاومت برشی استفاده کرد. بنابراین با توجه به حاکمیت تنش مؤثر در این آزمایش CU، می‌نویسیم:

$$(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)\tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + \boxed{2c'\tan(45 + \frac{\phi'}{2})}$$

در رس عادی تحکیم‌یافته $c' = 0$ بوده و حاصل این عبارت صفر است

$$\Rightarrow (60 + 80 - 20) = (60 - 20)\tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) \Rightarrow \phi' = 30^\circ$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

F-۱- پس‌فشار

مفهوم **پس‌فشار** (u_{BP}) یکی از موضوعات جالب در بحث آزمایش‌های سه محوری است که اغلب دانشجویان عزیز در درک صحیح آن دچار مشکل هستند. در این بخش می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، آن را برای شما شرح دهیم تا این موضوع را به‌خوبی یاد بگیرید:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: پس‌فشار چیست و علت استفاده از آن در آزمایش‌های سه محوری چه می‌باشد؟

پاسخ: در آزمایش‌های سه محوری CD و CU مرسوم است که قبل از شروع آزمایش، با اتصال نمونه به یک منبع فشار ثابت، فشار آب حفره‌ای خاک را به‌طور مصنوعی افزایش می‌دهند. این فشار آب حفره‌ای مصنوعی، پس‌فشار (*Back Pressure*) نامیده می‌شود و دلایل استفاده از آن را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

الف) با انتقال نمونه از عمق خاک به سطح خاک، فشار آب حفره‌ای نمونه بسیار ناچیز و تقریباً برابر صفر می‌شود. اعمال پس‌فشار باعث می‌شود تا فشار آب حفره‌ای نمونه به شرایط طبیعی نزدیک گردد.

ب) نمونه‌های رسی کم نفوذ دارای حفره‌های بسیار ریز هستند که قطرات آب نمی‌توانند به درون آنها وارد شوند. اعمال پس‌فشار باعث می‌شود تا قطرات آب کوچکتر شده و بتوانند داخل این حفره‌ها نفوذ کنند.

ج) همانطور که دیدید در آزمایش CU، نمونه‌های ماسه‌ای متراکم و رس پیش تحکیم‌یافته ممکن است در لحظهٔ گسیختگی دارای فشار آب حفره‌ای منفی باشند که این فشار منفی، باعث ایجاد مکش و آسیب رساندن به دستگاه آزمایش می‌شود. اعمال پس‌فشار باعث می‌شود تا فشار آب حفره‌ای کل در نمونه از حالت منفی و مکش خارج گردد:

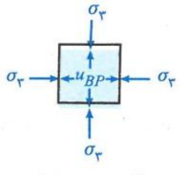
$$u_f = \underbrace{u_{BP}}_{\text{مثبت بزرگ}} + \underbrace{\Delta u_d}_{\text{منفی}} > 0$$

سؤال ۲: به‌نظر شما آیا اعمال پس‌فشار باعث کاهش تنش مؤثر و خرابی نمونه خواهد شد؟ اگر پاسخ شما مثبت است، برای رفع این مشکل چه باید کرد؟

پاسخ: اعمال پس‌فشار، مطابق شکل زیر باعث کاهش تنش مؤثر و خرابی نمونه می‌شود:

$\sigma' = \sigma - u = 0 - u_{BP} = -u_{BP} < 0 \Rightarrow$ نمونه ناپایدار می‌شود

برای رفع این مشکل، همزمان با اعمال پس‌فشار، فشار محفظه‌ای نیز به اندازهٔ پس‌فشار افزایش می‌یابد تا تنش مؤثر در نمونه ثابت مانده و خاک پایدار باقی بماند.



$\sigma' = \sigma - u = u_{BP} - u_{BP} = 0 \Rightarrow$ نمونه ناپایدار نمی‌شود

سؤال ۳: فرض کنید در یک آزمایش سه محوری، پس‌فشار برابر $50\ kPa$ است. اگر σ_3 در نهایت به $150\ kPa$ برسد، به نظر شما چقدر از σ_3 اعمال شده (از این $150\ kPa$) باعث محکم شدن نمونه شده است؟

پاسخ: فشار همه جانبه σ_3 که به نمونه اعمال می‌شود را می‌توان به دو قسمت زیر تفکیک کرد:

$$\sigma_{3\,\text{اعمال شده}} = \sigma_{3\,\text{اولیه}} + \sigma_{3\,\text{تحکیمی}}$$

($\sigma_{3\,\text{اولیه}}$: به‌طور همزمان و برابر با پس‌فشار اعمال می‌شود تا مانع از خرابی نمونه گردد.)

زیر شاخه‌های قسمت ششم

F-۱- پس‌فشار

F-۲- آشنایی با پارامترهای اسکمپتون

F-۳- مفهوم مسیر تنش

پس در پاسخ به پرسش مطرح شده می‌توان گفت:

$$\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}} = \sigma_{3_{\text{اعمال شده}}} - u_{BP} = 150 - 50 = 100\,kPa$$

سؤال ۴: چنانچه در آزمایش‌های CD و CU از پس‌فشار استفاده کنیم، در آن‌صورت در انتهای آزمایش، فشار اندازه‌گیری شده توسط دستگاه (u_f) شامل چه بخش‌هایی خواهد بود؟

پاسخ: در حالت کلی در آزمایش‌های CD و CU، فشار آب حفره‌ای نمونه در لحظهٔ گسیختگی (u_f)، را می‌توان شامل اجزاء زیر دانست:

$$u_f = u_0 + u_{BP} + \Delta u_d \simeq u_{BP} + \Delta u_d \Rightarrow \begin{cases} CD \xrightarrow{\Delta u_d = 0} u_f \simeq u_{BP} \\ CU \xrightarrow{\Delta u_d \neq 0} u_f \simeq u_{BP} + \Delta u_d \end{cases}$$

u_0: فشار موجود در خود نمونه که چون دارای ضخامت کم است، تقریباً برابر صفر است.

u_{BP}: پس‌فشار

Δu_d: اضافه فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی نمونه در مرحلهٔ دوم‌آزمایش

سؤال ۵: در آزمایش‌های سه محوری CD و CU که با اعمال پس‌فشار انجام می‌شوند، برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک، چگونه تنش‌های اعمال شده و فشار آب حفره‌ای را در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی به‌کار می‌بریم؟

پاسخ: در این شرایط باید پس‌فشار و $\sigma_{3_{\text{اولیه}}}$ که معادل با پس‌فشار است را کنار گذاشته و از Δu_d و $\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}}$ استفاده کنیم. برای درک بهتر این موضوع به نحوهٔ نوشتن رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی در آزمایش‌های CD و CU توجه کنید:

الف) آزمایش CD

$$(\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}} + \Delta\sigma_d) = (\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}})\tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45 + \frac{\phi'}{2})$$

ب) آزمایش CU در حاکمیت تنش مؤثر

$$(\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}} + \Delta\sigma_d - \Delta u_d) = (\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}} - \Delta u_d)\tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45 + \frac{\phi'}{2})$$

ج) آزمایش CU در حاکمیت تنش کل

$$(\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}} + \Delta\sigma_d) = (\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}})\tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45 + \frac{\phi}{2})$$

تذکر: بررسی سؤالات کنکور نشان می‌دهد که وقتی از آزمایش CU با اعمال پس‌فشار استفاده می‌کنیم، معمولاً حاکمیت تنش مؤثر مدنظر است، حتی اگر در صورت سؤال اشارهٔ دقیقی به این موضوع نشده باشد.

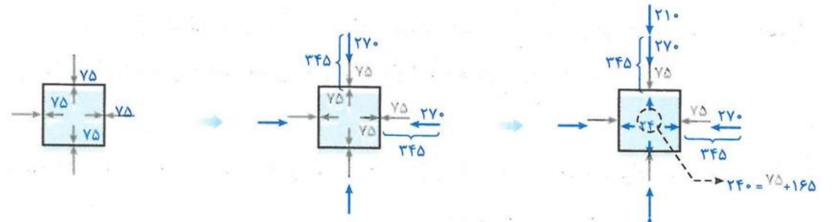
در ادامه با حل یک تمرین، بحث پس‌فشار را بهتر یاد می‌گیریم.

تمرین ۳۴: در یک آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده (CU) بر روی نمونه‌ای از رس اشباع عادی تحکیم‌یافته، فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی $240\,kN/m^2$ اندازه‌گیری شده است. اگر فشار جانبی σ_3 برابر $345\,kN/m^2$ و پس‌فشار $75\,kN/m^2$ و تفاوت تنش در لحظهٔ گسیختگی $210\,kN/m^2$ باشد، مطلوب است تعیین:

الف) زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک (سراسری - ۸۴)

ب) زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت تنش کل

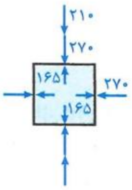
حل: وضعیت اعمال تنش و فشار بر نمونه در این حالت به‌صورت زیر است:



اعمال پس‌فشار u_{BP} و $\sigma_{3_{\text{اولیه}}}$ که مساوی u_{BP} است. ($\sigma_{3_{\text{اولیه}}} = u_{BP} = 75kPa$)

اعمال تنش $\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}}$ ($\sigma_{3_{\text{تحکیمی}}} = 345 - 75$)

اعمال تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ ($\Delta\sigma_d = 210kPa$)



در ادامه طبق آنچه گفتیم $u_{BP} = \sigma_{3\,\text{اولیه}} = 75\,kPa$ را از تنش همه جانبه ($\sigma_3 = 345$) و فشار آب حفره‌ای ($u_f = 240\,kPa$) کنار گذاشته و تنش‌ها و فشارهای باقی‌مانده را در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی قرار می‌دهیم. بر همین اساس المان تنش‌های اصلی و فشار آب حفره‌ای در داخل نمونه در لحظهٔ گسیختگی به‌صورت شکل مقابل خواهد بود.

در نهایت نیز این مسئله را در دو حالت حاکمیت تنش مؤثر و تنش کل به‌صورت زیر حل می‌کنیم:

الف) حاکمیت تنش مؤثر برای تعیین ϕ' و c':

$$(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2}) \quad , \quad c' = 0 \quad \text{(رس عادی تحکیم‌یافته)}$$

$$\Rightarrow (270 + 210 - 165) = (270 - 165)\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 0 \Rightarrow \phi' = 30^\circ$$

(270: σ_3 تحکیمی؛ 210: $\Delta\sigma_d$؛ 165: فشار آب حفره‌ای بدون u_{BP})

ب) حاکمیت تنش کل برای تعیین ϕ و c:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\phi}{2})$$

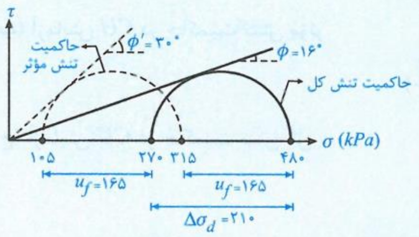
($c = 0$، رس عادی تحکیم‌یافته) صفر

$$(270 + 210) = (270)\tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 0 \Rightarrow \tan(45+\frac{\phi}{2}) = \frac{4}{3} = \tan 53^\circ \Rightarrow 45 + \frac{\phi}{2} = 53 \Rightarrow \phi = 16^\circ$$

(270: σ_3 تحکیمی؛ 210: $\Delta\sigma_d$)

کمی توجه

شکل دایرهٔ مور در حالت‌های تنش مؤثر و تنش کل در این تمرین به‌صورت زیر است:



F-۲- آشنایی با پارامترهای اسکمپتون

فرض کنید بر روی یک نمونه خاک رسی آزمایش سه محوری UU (با $\sigma_3 = 50\,kPa$ و تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$) انجام می‌دهیم و مراحل بارگذاری آن از ابتدا تا لحظهٔ گسیختگی به‌صورت زیر است:

مرحلهٔ اول: مرحلهٔ اعمال فشار همه جانبهٔ σ_3 و افزایش تدریجی آن تا $\sigma_3 = 50\,kPa$

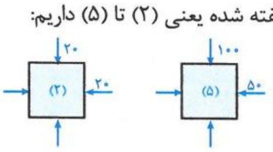
مرحلهٔ دوم: مرحلهٔ اعمال تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ و افزایش تدریجی آن تا گسیختگی نمونه

حال اگر از ما بپرسند که فشار آب حفره‌ای موجود در نمونه در اثر تغییر بارگذاری از حالت (۲) به (۵) چقدر تغییر می‌کند، به‌نظر شما پاسخ چیست؟

در پاسخ به این سؤال، اسکمپتون متوجه شد که تغییرات فشار آب حفره‌ای در خاک‌ها ناشی از **تغییرات تنش‌های اصلی کل** می‌باشد و بر همین اساس رابطهٔ زیر را جهت تعیین تغییرات فشار آب حفره‌ای پیشنهاد کرد:

$$\Delta u = B\,[\Delta\sigma_3 + A\,(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

در رابطهٔ بالا $\Delta\sigma_3$ و $\Delta\sigma_1$ به‌ترتیب تغییرات تنش‌های افقی و قائم کل می‌باشند و برای مثال فوق در محدودهٔ گفته شده یعنی (۲) تا (۵) داریم:



تغییرات تنش افقی: $\Delta\sigma_3 = 50 - 20 = 30\,kN/m^2$

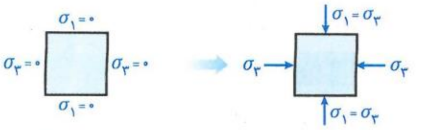
تغییرات تنش قائم: $\Delta\sigma_1 = 100 - 20 = 80\,kN/m^2$

$$\Rightarrow \Delta u = B\,[30 + A\,(80 - 30)] = 30B + 50AB$$

حتماً از خود می پرسید که که A و B در روابط بالا چه نام دارند و به چه کاری می‌آیند؟ در جواب شما باید بگوییم کـه B و A ، **پارامترهای فشار آب حفره‌ای اسکمپتون** و یا به اختصار **پارامترهای اسکمپتون** نامیده می‌شوند و برای تعیین آنها و درک مفهومشان کافی است تا یـک آزمایش UU را از ابتدا تا انتها دنبال کنیم.

تعیین پارامتر B اسکمپتون

می‌دانیم در مرحلهٔ اول آزمایش UU، تنش‌های همه جانبهٔ یک المان را از صفر به مقدار σ_3 می‌رسانیم، بنابراین با توجه به رابطهٔ اسکمپتون می‌نویسیم:



(شروع مرحلهٔ اول) (خاتمهٔ مرحله اول)

$$\begin{cases} \Delta u = \Delta u_c \ \text{(اضافه فشار در مرحلهٔ اول آزمایش سه محوری)} \\ \Delta\sigma_1 = \sigma_1 - 0 = \sigma_3 - 0 = \sigma_3 \\ \Delta\sigma_3 = \sigma_3 - 0 = \sigma_3 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \ \Delta u_c = B \times [\sigma_3 + A \times (\sigma_3 - \sigma_3)] = B\,\sigma_3 \ \Rightarrow \ \boxed{B = \frac{\Delta u_c}{\sigma_3}}$$

درک بهتر

ضریب B در واقع سهم اضافه فشار آب حفره‌ای از تنش همه جانبهٔ σ_3 است که بر نمونه وارد می‌گردد. اگر خاک اشـباع باشـد، آب تمـام این σ_3 را می‌گیرد و $B = 1$ خواهد شد ولی اگر خاک اشباع نباشد، هوا هم سهمی از σ_3 دارد و دیگر Δu_c با σ_3 برابر نبوده و قطعاً از آن کمتر خواهد بود. در این شرایط خواهیم داشت:

$$S_r < 1 \ \Rightarrow \ B = \frac{\Delta u_c}{\sigma_3} < 1$$

در مورد پارامتر B اسکمپتون توجه کنید که:

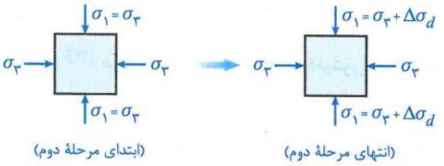
۱) این پارامتر فقط به درصد اشباع خاک بستگی دارد، به‌طوری‌که در خاک خشک مقـدار آن برابـر صـفر و در خـاک اشـباع، مقـدار آن ماکزیمم بوده و برابر یک است.

۲) افزایش مقدار B با افزایش S_r، ارتباط خطی ندارد.

۳) اگر در مرحلهٔ اول آزمایش، شیرهای زهکشی باز شوند، عملاً اضافه فشاری در این مرحلـهٔ بـه‌وجـود نمـی‌آیـد و محاسـبهٔ ضـریب B، بی‌معناست.

تعیین پارامتر A اسکمپتون

برای تعیین پارامتر A اسکمپتون، مشابه با تعیین پارامتر B عمل می‌کنیم، به‌این ترتیب که دو المان زیر را که مربوط به ابتدا و انتهای مرحله دوم آزمایش UU (شروع اعمال $\Delta\sigma_d$ تا گسیختگی) هستند را در نظر گرفته و با کمک رابطهٔ اسکمپتون، A را می‌یابیم:



(ابتدای مرحلهٔ دوم) (انتهای مرحلهٔ دوم)

$$\begin{cases} \Delta u = \Delta u_d \ \text{(اضافه فشار آب حفره‌ای در مرحلهٔ دوم آزمایش)} \\ \Delta\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d - \sigma_3 = \Delta\sigma_d \\ \Delta\sigma_3 = \sigma_3 - \sigma_3 = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \ \Delta u_d = B \times [0 + A \times (\Delta\sigma_d - 0)] \ \Rightarrow \ \boxed{A = \frac{\Delta u_d}{B\,\Delta\sigma_d}}$$

در ادامه با ذکر چند تذکر مهم در رابطه با پارامتر A اسکمپتون، مطالب این بخش را به پایان می‌رسانیم:

تذکر ۱: اگر نمونهٔ خاک اشباع باشد، ضریب A اسکمپتون از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{\Delta u_d}{B\,\Delta\sigma_d} \xrightarrow[(B=1)]{\text{خاک اشباع}} A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d}$$

علاوه بر این، رابطهٔ بالا را در یک آزمایش CU نیز استفاده می‌کنند، زیرا در مرحلهٔ اول آزمایش CU نمونه تحکیم می‌یابد و $\Delta u_c = 0$ است. پس عملاً ضریب B وارد محاسبات نمی‌گردد.

تذکر۲: رابطه A در حالت خاک اشباع و آزمایش CU که در تذکر (۱) آن را به‌دست آوریم به ما می‌گوید که چقدر از تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ صرف افزایش (و یا حتی کاهش) Δu_d شده است. به‌عنوان مثال اگر $A = ۰/۸$ باشد و نمونه با $\Delta\sigma_d = ۱۰۰\, kN/m^۲$ گسیخته شود، به این معنی است که اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از تنش انحرافی برابر $۸۰\, kN/m^۲$ می‌باشد، زیرا:

$$\Delta u_d = A \times \Delta\sigma_d = ۰/۸ \times ۱۰۰ = ۸۰\, kN/m^۲$$

تذکر۳: پارامتر A ضریبی است که بر خلاف پارامتر B (که فقط تابعی از درصد اشباع خاک است)، به عوامل متعددی مانند درصد اشباع خاک، نوع خاک، نسبت پیش‌تحکیمی (OCR)، فشار جانبی اولیه ($\sigma_۳$) و محدودهٔ بارگذاری نیز بستگی دارد.

تذکر۴: پارامتر A اسکمپتون معمولاً در لحظهٔ گسیختگی مدنظر است و با کمک آن می‌توان در مورد انواع خاک‌ها به‌صورت زیر اظهار نظر کرد:

A	توصیف خاک
بزرگتر از یک	خاک‌های رسی با حساسیت زیاد
بین ۱ تا ۰/۵	خاک با قابلیت فشردگی زیاد یا رس عادی تحکیم یافته (NC)
بین ۰/۵ تا صفر	خاک با قابلیت فشردگی کم یا رس کمی پیش‌تحکیم یافته (OC)
بین صفر تا ۰/۵−	خاک با قابلیت فشردگی بسیار کم یا رس بسیار پیش‌تحکیم یافته (OC)

A : پارامتر اسکمپتون در لحظهٔ گسیختگی نمونه

تذکر۵: اگر پارامتر A اسکمپتون در لحظهٔ گسیختگی برابر **یک** باشد، ثابت می‌شود که تغییر شکل جانبی نمونه در لحظهٔ گسیختگی صفر است. عکس این مطلب نیز برقرار است، یعنی اگر تغییر شکل جانبی نمونه در لحظهٔ گسیختگی صفر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که $A = ۱$ بوده و $\Delta u_d = \Delta\sigma_d$ است.

در ادامه با حل چند تمرین متنوع، درک بهتری از ضرایب A و B اسکمپتون خواهیم داشت.

تمرین ۳۵: در مرحله اول آزمایش سه محوری UU ، فشار $۲۰۰\, kPa$ به‌صورت همه جانبه باعث افزایش فشار آب حفره‌ای تا $۱۹۰\, kPa$ می‌شود. سپس در مرحله دوم با افزایش تنش قائم تا $۴۰۰\, kPa$ ، فشار آب حفره‌ای به $۱۵۲\, kPa$ کاهش می‌یابد. ضرایب فشار آب حفره‌ای اسکمپتون را به‌دست آورید و در مورد نوع خاک اظهارنظر کنید. (سراسری - ۹۱)

حل: برای محاسبهٔ ضرایب A و B، تغییر فشار آب حفره‌ای در مرحله اول و دوم آزمایش را بررسی می‌کنیم.

مرحلهٔ اول: در این مرحله، $\sigma_۳ = ۲۰۰\, kPa$ است و $\Delta u_c = ۱۹۰\, kPa$ شده است. با توجه به این موضوع داریم:

$$B = \frac{\Delta u_c}{\sigma_۳} = \frac{۱۹۰}{۲۰۰} = ۰/۹۵$$

مرحلهٔ دوم: پس از محاسبهٔ B ، با توجه به اینکه در مرحلهٔ دوم فشار آب حفره‌ای از $۱۹۰\, kPa$ به $۱۵۲\, kPa$ رسیده است، خواهیم داشت:

$$A = \frac{\Delta u_d}{B\, \Delta\sigma_d} = \frac{(۱۵۲-۱۹۰)}{۰/۹۵ \times (۴۰۰-۲۰۰)} = -۰/۲$$

چون A بین صفر و ۰/۵− به‌دست آمده است، بنابراین خاک رس موردنظر در آزمایش UU از نوع رس بسیار پیش‌تحکیم یافته ($OCR > ۴$) می‌باشد.

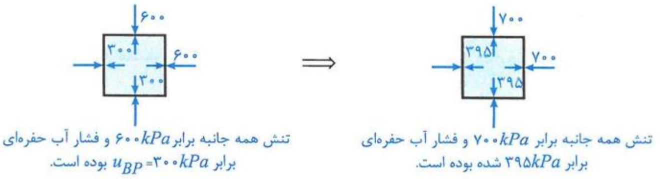
تمرین ۳۶: در مورد ضرایب A و B اسکمپتون، گزینهٔ صحیح کدام است؟ (سراسری - ۹۲)

۱) در خاک‌های رسی با OC بالا، $۰/۵ > A > ۰$ می‌باشد، چون خاک در برش، رفتار انقباضی دارد.
۲) در خاک‌های رسی با OC بالا، $۰ > A > -۰/۵$ می‌باشد، چون خاک در برش، رفتار اتساعی دارد.
۳) در خاک‌های رسی NC، $۰ < A < -۰/۵$ می‌باشد، چون خاک در برش، رفتار اتساعی دارد.
۴) در خاک‌های رسی NC، $۰/۵ < A < ۰$ می‌باشد، چون خاک در برش، رفتار انقباضی دارد.

حل: با توجه به مطالب گفته شده در متن درس و تمرین قبل، گزینه (۲) پاسخ درست این تست است. توجه کنید که منظور از رفتار اتساعی در هنگام برش، افزایش حجم نمونه در مرحلهٔ دوم آزمایش سه محوری در لحظهٔ گسیختگی می‌باشد که در قسمت قبل (بخش نمودار رفتار خاک‌ها در آزمایش‌های CD و CU) در مورد آن صحبت کردیم و دیدیم که در رس‌های پیش‌تحکیم یافته و ماسهٔ متراکم این اتفاق رخ می‌دهد. (در چنین شرایطی ضریب A اسکمپتون نیز در محدودهٔ $۰ > A > -۰/۵$ قرار می‌گیرد.)

تمرین ۳۷: با استفاده از دستگاه سه‌محوری، ابتدا عمل تحکیم بر روی یک نمونه خاک تحت فشار محفظه‌ای $۶۰۰\ kN/m^۲$ و پس‌فشار $۳۰۰\ kN/m^۲$ انجام می‌شود و سپس در شرایط زهکشی نشده، فشار محفظه‌ای به $۷۰۰\ kN/m^۲$ افزایش داده می‌شود که در نتیجهٔ آن، مقدار فشار آب حفره‌ای به $۳۹۵\ kN/m^۲$ می‌رسد. پارامتر فشار آب منفذی B اسکمپتون در این مرحله چقدر است؟

حل: بهترین روش برای تحلیل چنین سؤالاتی، رسم المان‌ها در هر مرحله از بارگذاری است. با در نظر گرفتن محدودهٔ بارگذاریِ تحکیم نیافته، خواهیم داشت:

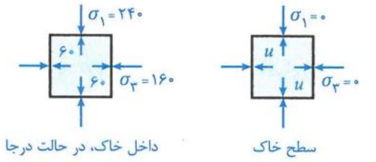


$$\begin{cases} \Delta u = \Delta u_c = ۳۹۵ - ۳۰۰ = ۹۵ \\ \Delta\sigma_۳ = ۷۰۰ - ۶۰۰ = ۱۰۰ \\ \Delta\sigma_۱ = ۷۰۰ - ۶۰۰ = ۱۰۰ \end{cases} \Rightarrow \Delta u_c = B\left[\Delta\sigma_۳ + A(\Delta\sigma_۱ - \Delta\sigma_۳)\right] \Rightarrow ۹۵ = B \times [۱۰۰ + A \times (۱۰۰ - ۱۰۰)] \Rightarrow B = ۰/۹۵$$

تمرین ۳۸: تنش‌های قائم، افقی و فشار آب حفره‌ای یک خاک رسی اشباع در حالت درجا به‌ترتیب برابر با ۲۴۰، ۱۶۰ و ۶۰ کیلونیوتن بر مترمربع می‌باشند. اگر ضریب فشار آب حفره‌ای A برابر با ۰/۷۵ باشد، فشار آب حفره‌ای موجود در این نمونه خاک پس از انتقال به سطح زمین (صفر شدن تنش‌های کل آن و عدم تورم) برحسب $kN/m^۲$ چقدر است؟ (یادآوری: $\left(\Delta u = B\left[\Delta\sigma_۳ + A(\Delta\sigma_۱ - \Delta\sigma_۳)\right]\right)$ (سراسری - ۸۷)

۱) ۲۸۰ ۲) ۱۶۰− ۳) ۲۸۰− ۴) ۱۶۰

حل: وضعیت المان تنش‌ها برای نمونهٔ موردنظر در داخل خاک و سطح خاک به‌صورت زیر است:



برای یافتن u، ابتدا Δu را از رابطهٔ اسکمپتون (که در صورت سؤال هم داده شده است)، محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{cases} \Delta u = B \times [\Delta\sigma_۳ + A \times (\Delta\sigma_۱ - \Delta\sigma_۳)] \\ B = ۱ \text{ (خاک اشباع است)} \quad , \quad A = ۰/۷۵ \text{ (اطلاعات صورت سؤال)} \\ \Delta\sigma_۳ = ۰ - ۱۶۰ = -۱۶۰\ kN/m^۲ \\ \Delta\sigma_۱ = ۰ - ۲۴۰ = -۲۴۰\ kN/m^۲ \end{cases} \Rightarrow \Delta u = ۱ \times [-۱۶۰ + ۰/۷۵ \times (-۲۴۰ \underbrace{+۱۶۰}_{-(-۱۶۰)})] = -۲۲۰\ kN/m^۲$$

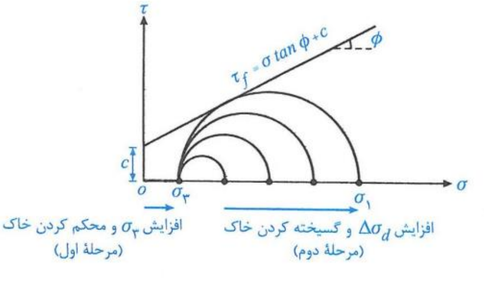
و در نهایت با توجه به اینکه فشار اولیهٔ المان $u_۰ = ۶۰\ kPa$ می‌باشد، u برابر خواهد بود با:

$$\Delta u = u - u_۰ \Rightarrow u = u_۰ + \Delta u = ۶۰ + (-۲۲۰) = -۱۶۰\ kN/m^۲$$

بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ درست این تست است.

F-۳- مفهوم مسیر تنش

همانطورکه از قبل به یاد دارید، برای گسیختگی خاک باید دایره مور المان تنش‌ها آنقدر بزرگ شود که بر خط گسیختگی مور- کولمب مماس گردد:

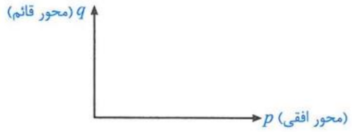


ما در شکل‌های صفحهٔ قبل به نوعی سعی کرده‌ایم که مراحل بارگذاری نمونه از ابتدا تا لحظهٔ‌گسیختگی را نشان دهیم ولی در این نمایش با دو مشکل اساسی مواجهیم:

۱- مرحله اول آزمایش و چگونگی افزایش $\sigma_۳$ به‌طور واضح مشخص نبوده و ملموس نیست.

۲- تشخیص مرحلهٔ دوم آزمایش و بررسی آن از روی شکل، دشوار می‌باشد.

وجود این دو مشکل در نحوهٔ نمایش مراحل بارگذاری نمونه (از ابتدا تا لحظهٔ گسیختگی آن) باعث شد تا محققین علم مکانیک خاک از نموداری به نام **مسیر تنش** استفاده کنند تا از این طریق درک بهتری از مراحل بارگذاری بر روی خاک ایجاد گردد.



مسیر تنش نموداری است که تغییرات تنش در خاک را از لحظهٔ شروع بارگذاری تا زمان گسیختگی نشان می‌دهد. جالب است بدانید که بر خلاف آنچه تا کنون بررسی شد، مسیر تنش در فضای تنش‌های τ و σ رسم نمی‌شود و قرار نیست لحظهٔ گسیختگی را خط مور- کولمب نشان دهد. برای رسم مسیر تنش، مختصات جدیدی استفاده می‌شود که محور افقی آن را با p و محور قائم را با q نشان داده و به آن **فضای تنش p و q** می‌گوییم.

تغییر متغیری که فضای p و q را با آن بیان می‌کنیم، معمولاً براساس ترکیبی از تنش‌های اصلی $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ است و می‌تواند به هر شکل دلخواهی باشد.

در ادامهٔ بحث می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، ابتدا شما را با متداول‌ترین فضای p و q آشنا کرده و سپس نحوهٔ ترسیم مسیر تنش را به شما یاد بدهیم.

بررسی چند سوال

سؤال ۱: p و q در متداول‌ترین فضای تنش به چه صورت تعریف می‌شوند؟

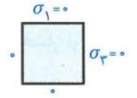
پاسخ: p و q در متداول‌ترین فضای تنش به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$p=\frac{\sigma_۱+\sigma_۳}{۲}\ ,\ q=\frac{\sigma_۱-\sigma_۳}{۲}$$

سؤال ۲: در مرحلهٔ اول آزمایش سه محوری که فقط تنش‌های همه جانبهٔ $\sigma_۳$ به نمونه وارد می‌شوند، نمودار تغییرات تنش در مختصات p و q تعریف شده (متداول) چگونه است؟

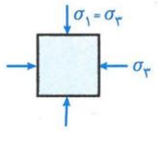
پاسخ: با نمایش المان تنش‌ها در ابتدا و انتهای مرحلهٔ اول آزمایش سه محوری، p و q را برای این لحظات می‌یابیم و سپس با وصل کردن دو نقطهٔ ابتدایی و انتهایی مرحلهٔ اول در مختصات $(p\,,q)$، نمودار مسیر تنش در این مرحله را ترسیم می‌کنیم.

ابتدای مرحلهٔ اول

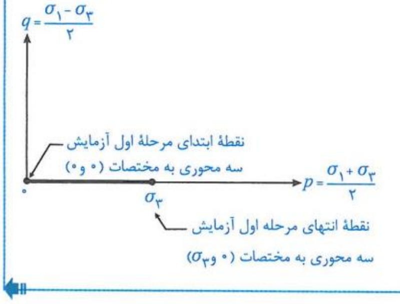


$$\Rightarrow\begin{cases}p=\frac{\sigma_۱+\sigma_۳}{۲}=\frac{۰+۰}{۲}=۰\\ q=\frac{\sigma_۱-\sigma_۳}{۲}=\frac{۰-۰}{۲}=۰\end{cases}$$

انتهای مرحلهٔ اول

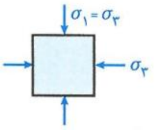


$$\Rightarrow\begin{cases}p=\frac{\sigma_۱+\sigma_۳}{۲}=\frac{\sigma_۳+\sigma_۳}{۲}=\sigma_۳\\ q=\frac{\sigma_۱-\sigma_۳}{۲}=\frac{\sigma_۳-\sigma_۳}{۲}=۰\end{cases}$$

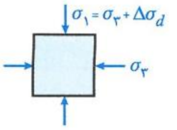


سؤال ۳: در مرحلهٔ دوم آزمایش سه محوری که در آن با افزایش تنش قائم $\Delta\sigma_d$ نمونه گسیخته می‌شود، نمودار مسیر تنش در مختصات p و q متداول به چه شکل است؟

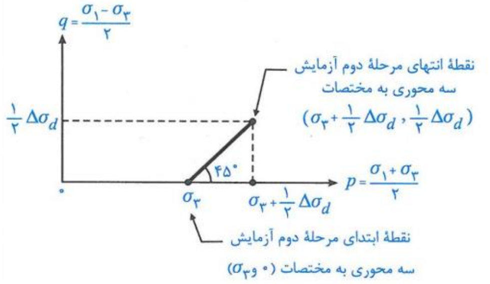
پاسخ: مشابه با مرحلهٔ اول خواهیم داشت:



ابتدای مرحلهٔ دوم $\Rightarrow \begin{cases} p=\dfrac{\sigma_1+\sigma_3}{2}=\dfrac{\sigma_3+\sigma_3}{2}=\sigma_3 \\ q=\dfrac{\sigma_1-\sigma_3}{2}=\dfrac{\sigma_3-\sigma_3}{2}=0 \end{cases}$



انتهای مرحلهٔ دوم $\Rightarrow \begin{cases} p=\dfrac{\sigma_1+\sigma_3}{2}=\dfrac{\sigma_3+\Delta\sigma_d+\sigma_3}{2}=\sigma_3+\dfrac{1}{2}\Delta\sigma_d \\ q=\dfrac{\sigma_1-\sigma_3}{2}=\dfrac{1}{2}\Delta\sigma_d \end{cases}$



سؤال ۴: در مختصات τ و σ خرابی هنگامی رخ می‌داد که دایرهٔ مور بر خط گسیختگی مور- کولمب مماس می‌شد. در مختصات p و q خط معادل با حالت گسیختگی چیست؟

پاسخ: از آنجائیکه در فضای p و q از تنش‌های اصلی σ_1 و σ_3 استفاده می‌کنیم، بنابراین از رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی کمک گرفته و می‌نویسیم:

این عبارت جایگزین $tan^2(45+\frac{\phi}{2})$ شده است.

$$\sigma_1=\sigma_3\left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right)+2c\left(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi}\right)\xrightarrow{\times(1-\sin\phi)}\sigma_1(1-\sin\phi)=\sigma_3(1+\sin\phi)+2c\cos\phi$$

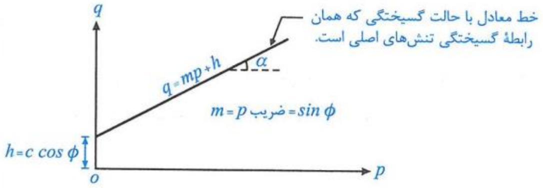
این عبارت جایگزین $tan(45+\frac{\phi}{2})$ شده است.

$$\xrightarrow{\text{ساده کردن عبارت}}\left(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\right)=\left(\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}\right)\sin\phi+c\cos\phi$$

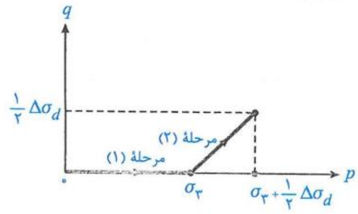
در ادامه با جایگذاری مقادیر $p=\dfrac{\sigma_1+\sigma_3}{2}$ و $q=\dfrac{\sigma_1-\sigma_3}{2}$ در رابطهٔ بالا، خواهیم داشت:

$$q=p\sin\phi+c\cos\phi$$

رابطهٔ بالا که همان رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی است، در مختصات p و q معادله یک خط راست با شیب $\sin\phi$ = ضریب p = m و عرض از مبدأ $h=c\cos\phi$ می‌باشد که آن را در شکل زیر نشان داده‌ایم:

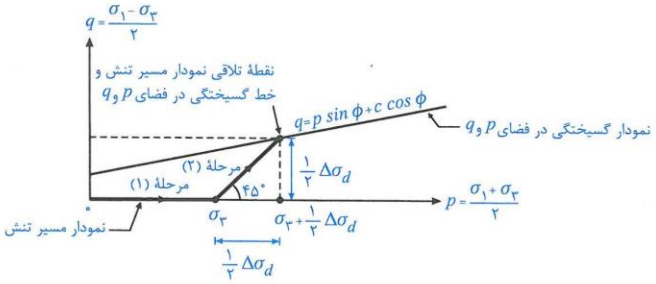


سؤال ۵: اگر مسیر تنش را در مرحلهٔ اول و دوم آزمایش سه محوری ترسیم کنیم، نمودار آن به شکل زیر است:



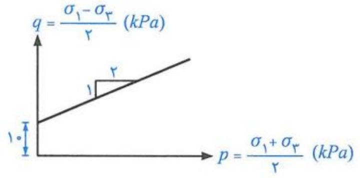
به نظر شما چگونه می‌توان گفت در کدام نقطه از این نمودار، گسیختگی رخ داده است؟

● پاسخ: همانطورکه به یاد دارید، در فضای τ و σ گسیختگی وقتی رخ می‌دهد که دایره مور بر خط مور- کولمب مماس شود. در فضای p و q نیز در هنگام گسیختگی، نمودار مسیر تنش به خط $q = p\sin\phi + c\cos\phi$ می‌رسد که این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است:



در ادامه با حل چند تمرین، این قسمت را به پایان می‌بریم.

تمرین ۳۹: نتایج یک سری آزمایش سه محوری در محورهای مختصات $q - p$ به شکل زیر نشان داده شده است. ϕ و c برای این خاک به‌ترتیب از راست به چپ حدوداً چند درجه و چند kPa هستند؟ (سراسری - ۹۰)



۱) ۳۰ و ۱۱/۵
۲) ۳۰ و ۱۰
۳) ۳۵ و ۱۱/۵
۴) ۳۵ و ۱۰

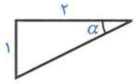
● حل: طبق آنچه گفتیم معادلهٔ خط ترسیم شده در فضای $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ و $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ در شکل بالا، به‌صورت زیر است:

$$q = m\,p + h$$

$m =$ شیب خط $= \sin\phi$

$h = c\cos\phi = 10\ kPa$

ابتدا با کمک گرفتن از شیب نمودار، خواهیم داشت:



$$\begin{cases} \text{شیب خط} = \tan\alpha = \dfrac{\text{ضلع مقابل}}{\text{ضلع مجاور}} = \dfrac{1}{2} \\ \text{شیب خط} = \sin\phi \end{cases} \Rightarrow \sin\phi = \frac{1}{2} \Rightarrow \phi = 30^\circ$$

و در ادامه با کمک گرفتن از عرض از مبدأ نمودار، می‌نویسیم:

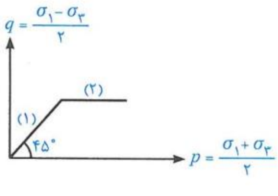
$$\text{عرض از مبدأ} = h = c\cos\phi \Rightarrow c = \frac{h}{\cos\phi} = \frac{10}{\cos 30} = \frac{10}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{20\sqrt{3}}{3} \simeq 11/5\ kPa$$

بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۴۰: مسیر تنش برروی یک نمونه خاک ابتدا با خطی ۴۵ درجه شروع شده و سپس با یک خط افقی ادامه می‌یابد. در خصوص نحوهٔ بارگذاری روی این نمونه، کدام مورد صورت پذیرفته است؟ (سراسری - ۸۸)

۱) بارگذاری تک‌محوری و سپس بارگذاری سه‌محوری با نمو یکسان فشارهای اصلی
۲) بارگذاری سه‌محوری با نمو یکسان فشارهای اصلی و سپس بارگذاری تک‌محوری
۳) بارگذاری تک‌محوری و سپس بارگذاری سه‌محوری با نمو یکسان کرنش‌های اصلی
۴) بارگذاری سه‌محوری با نمو یکسان کرنش‌های اصلی و سپس بارگذاری تک‌محوری

● حل: ابتدا با توجه به توصیف صورت سؤال در مورد مسیر تنش، نمودار آن را رسم می‌کنیم:



در ادامهٔ حل، با توجه به نمودار رسم شده می‌نویسیم:

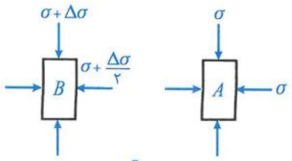
مرحلهٔ اول آزمایش به‌صورت بارگذاری تک‌محوری است. $\Rightarrow$ $\sigma_3 = 0 \Rightarrow \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \Rightarrow q = p \Rightarrow$ شیب خط 45° : (۱)

q ثابت است : (۲) $\Rightarrow \Delta q = 0 \Rightarrow \dfrac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}{2} = 0 \Rightarrow$

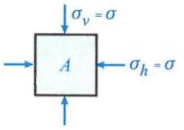
مرحلهٔ دوم آزمایش به‌صورت بارگذاری سه محوری با رشد یکسان فشارهای اصلی می‌باشد. $\Rightarrow \Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_3$

بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح این تست است.

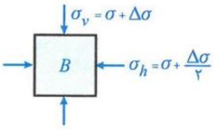
تمرین ۴۱: شرایط تنش روی یک المان، در ابتدا در حالت A و در انتها در حالت B می‌باشد. مسیر تنش در فضای $q = \sigma_v - \sigma_h$ و $p = \dfrac{\sigma_h + \sigma_v}{2}$ کدام است؟ (σ_h و σ_v به‌ترتیب تنش افقی و عمودی روی المان می‌باشند.) (سراسری - ۸۶)



حل: ابتدا مقادیر p و q را براساس اطلاعات داده شده در صورت سؤال، برای المان تنش‌ها در حالت‌های A و B می‌یابیم:

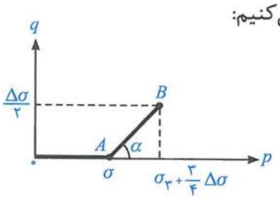


$$\Rightarrow \begin{cases} p = \dfrac{\sigma_h + \sigma_v}{2} = \dfrac{\sigma + \sigma}{2} = \sigma \\ q = \sigma_v - \sigma_h = \sigma - \sigma = 0 \end{cases} \Rightarrow A\Big|\begin{matrix}\sigma \\ 0\end{matrix}$$

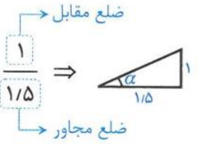


$$\Rightarrow \begin{cases} p = \dfrac{\sigma_h + \sigma_v}{2} = \dfrac{(\sigma + \frac{\Delta\sigma}{2}) + (\sigma + \Delta\sigma)}{2} = \sigma + \dfrac{3}{4}\Delta\sigma \\ q = \sigma_v - \sigma_h = (\sigma + \Delta\sigma) - (\sigma + \dfrac{\Delta\sigma}{2}) = \dfrac{\Delta\sigma}{2} \end{cases} \Rightarrow B\Big|\begin{matrix}\sigma + \frac{3}{4}\Delta\sigma \\ \frac{\Delta\sigma}{2}\end{matrix}$$

حال نقاط A و B را در دستگاه p و q مشخص کرده و با وصل کردن آنها به هم، مسیر تنش را مشخص می‌کنیم:



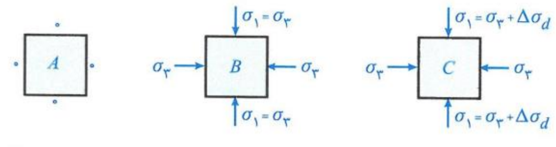
$$\tan\alpha = \frac{\text{ضلع مقابل}}{\text{ضلع مجاور}} = \frac{(\frac{\Delta\sigma}{2})}{(\sigma + \frac{3}{4}\Delta\sigma) - (\sigma)} = \frac{0/5}{0/75} = \frac{1}{1/5} \Rightarrow$$



بنابراین گزینهٔ (۱) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۴۲: در یک آزمایش سه محوری، نمونه پس از آنکه تحت فشار همه جانبهٔ σ_3 قرار گرفت، با افزایش تنش قائم به اندازهٔ $\Delta\sigma_d$، گسیخته می‌شود. مسیر تنش در فضای $p = \sigma_3$ و $q = \sigma_1$ را رسم کنید.

حل: ابتدا المان‌های تنش در مراحل مختلف بارگذاری را به‌صورت زیر نشان می‌دهیم:



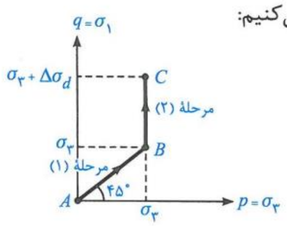
شروع مرحلهٔ اول — خاتمهٔ مرحلهٔ اول و شروع مرحلهٔ دوم — خاتمهٔ مرحلهٔ دوم

حال مقادیر p و q را برای هر المان می‌یابیم:

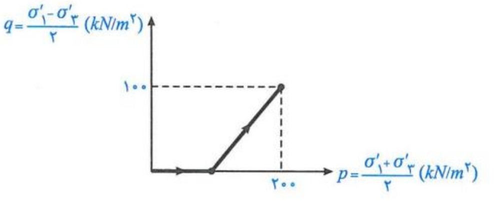
$$A \Rightarrow \begin{cases} p = \sigma_3 = 0 \\ q = \sigma_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow A\Big|\begin{matrix}0 \\ 0\end{matrix} \qquad B \Rightarrow \begin{cases} p = \sigma_3 \\ q = \sigma_1 = \sigma_3 \end{cases} \Rightarrow B\Big|\begin{matrix}\sigma_3 \\ \sigma_3\end{matrix}$$

$$C \Rightarrow \begin{cases} p = \sigma_3 \\ q = \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d \end{cases} \Rightarrow C\Big|\begin{matrix}\sigma_3 \\ \sigma_3 + \Delta\sigma_d\end{matrix}$$

در ادامه با مشخص کردن نقاط A و B و C در مختصات p و q و اتصال آنها به هم، مسیر تنش را رسم می‌کنیم:



تمرین ۴۳: یک نمونه خاک رس عادی‌تحکیم‌یافته را تحت آزمایش سه‌محوری CD قرار داده و مسیر تنش این آزمایش را مطابق شکل زیر در فضای p و q ترسیم می‌کنیم. زاویه اصطکاک داخلی مؤثر این نمونه چقدر است؟



حل: با توجه به مختصات نقطهٔ انتهایی مسیر تنش ترسیم شده (که معرف شرایط گسیختگی است) می‌توان نوشت:

$$\text{نقطهٔ انتهایی}\begin{cases} p=۲۰۰ \Rightarrow \dfrac{\sigma'_۱+\sigma'_۳}{۲}=۲۰۰ \Rightarrow \sigma'_۱+\sigma'_۳=۴۰۰ \\ q=۱۰۰ \Rightarrow \dfrac{\sigma'_۱-\sigma'_۳}{۲}=۱۰۰ \Rightarrow \sigma'_۱-\sigma'_۳=۲۰۰ \end{cases} \Rightarrow \left| \begin{array}{l} \sigma'_۱=۳۰۰ \\ \sigma'_۳=۱۰۰ \end{array}\right.$$

چون تنش‌های به‌دست‌آمده مربوط به لحظهٔ گسیختگی بوده و در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی صدق می‌کنند، بنابراین می‌نویسیم:

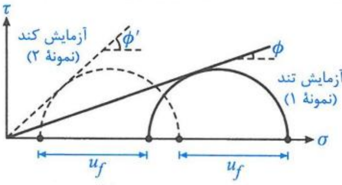
$$\sigma'_۱=\sigma'_۳\tan^۲(۴۵+\frac{\phi'}{۲})+۲\underbrace{c'}_{\text{(رس NC)}\ ۰}\tan(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow ۳۰۰=۱۰۰\tan^۲(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow \phi'=۳۰^\circ$$

تمرین ۴۴: دو نمونه از یک خاک رس اشباع و عادی‌تحکیم‌یافته، در دستگاه سه‌محوری قرار داده شده و ابتدا هر دو تحت فشار همه‌جانبه یکسان تحکیم می‌یابند. سپس در مرحله دوم آزمایش، در حالی که شیرهای زهکشی باز است، نمونه اول به سرعت و نمونه دوم به آرامی تحت تنش انحرافی قرار می‌گیرند تا گسیخته شوند. در مورد زاویه صفحهٔ شکست و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر آنها می‌توان گفت:

۱) زاویه صفحهٔ شکست و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر هر دو نمونه یکسان است.
۲) زاویه صفحهٔ شکست هر دو نمونه یکسان ولی زاویه اصطکاک داخلی مؤثر آنها متفاوت است.
۳) زاویه صفحهٔ شکست دو نمونه متفاوت ولی زاویه اصطکاک داخلی مؤثر آنها یکسان است.
۴) زاویه صفحهٔ شکست و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر دو نمونه متفاوت است.

● حل: نمونهٔ اول به علت سرعت بالای بارگذاری، فرصت زهکشی و صفر کردن اضافه فشار آب حفره‌ای خود را ندارد (هر چند که شیرهای زهکشی باز هستند) و در حالت زهکشی نشده و حاکمیت تنش کل گسیخته می‌شود. در این شرایط پارامترهای مقاومت برشی مربوط به حالت تنش کل می‌باشند.

از طرف دیگر نمونهٔ دوم تحت بارگذاری آرام قرار گرفته است و فرصت زهکشی و صفر کردن اضافه فشار آب حفره‌ای خود را دارد. بنابراین در حالت زهکشی شده و حاکمیت تنش مؤثر گسیخته می‌شود و پارامترهای مقاومت برشی آن مربوط به حالت تنش مؤثر می‌باشند.



حال با توجه به توضیحات فوق و دانستن این موضوع که در رس عادی تحکیم یافته $c = c' = 0$ است، خط گسیختگی را برای دو نمونه رسم می‌کنیم:

با توجه به اینکه زاویه اصطکاک داخلی دو نمونه در شرایط مذکور، متفاوت به‌دست آمده است، بنابراین می‌توان انتظار داشت که زاویهٔ صفحهٔ شکست آنها با هم متفاوت باشد:

$$\begin{cases} \theta_1 = 45 + \dfrac{\phi}{2} \\ \theta_2 = 45 + \dfrac{\phi'}{2} \end{cases} \xrightarrow{\phi' > \phi} \theta_2 > \theta_1$$

از طرف دیگر زاویه اصطکاک داخلی نمونه (۱) در حالت مؤثر همان زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه (۲) است که خود به‌صورت مؤثر (ϕ') می‌باشد.

پس زاویهٔ اصطکاک داخلی مؤثر هر دو نمونه یکسان بوده و زاویه صفحهٔ شکست آنها متفاوت است، از این‌رو گزینه (۳) پاسخ صحیح این تست می‌باشد.

تمرین ۴۵: یک نمونهٔ رسی بدون فشار همه جانبه σ_3 و تنها تحت تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$، در شرایط زهکشی نشده، بارگذاری و گسیخته می‌شود. اگر زاویه اصطکاک داخلی خاک در این حالت برابر ϕ باشد، در آن‌صورت چسبندگی خاک برابر است با:

۱) $\Delta\sigma_d \left(\dfrac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}\right)$
۲) $\dfrac{1}{2}\Delta\sigma_d \left(\dfrac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}\right)$
۳) $\dfrac{1}{2}\Delta\sigma_d \left(\dfrac{1-\sin\phi}{\cos\phi}\right)$
۴) $\Delta\sigma_d \left(\dfrac{1-\sin\phi}{\cos\phi}\right)$

● حل:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right) + 2c\left(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi}\right) \xrightarrow[\sigma_1 = \Delta\sigma_d]{\sigma_3 = 0} \Delta\sigma_d = 0 + 2c\left(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi}\right)$$

$$\Rightarrow c = \frac{1}{2}\Delta\sigma_d \left(\frac{1-\sin\phi}{\cos\phi}\right)$$

بنابراین گزینهٔ (۳) صحیح است.

تمرین ۴۶: یک نمونه خاک ماسه‌ای را تحت آزمایش برش مستقیم قرار می‌دهیم. این خاک با سربار قائم $600\ kN/m^2$ دارای مقاومت برشی $450\ kN/m^2$ است. اگر همین خاک را تحت آزمایش سه‌محوری CD با تنش همه‌جانبه $150\ kN/m^2$ قرار دهیم به چه میزان تنش انحرافی برای گسیخته شدن خاک نیاز داریم؟ ($\sin 37° = 0/6$)

۱) حداقل به $\Delta\sigma_d = 450\ kN/m^2$ نیاز داریم.

۲) با اعمال $\Delta\sigma_d = 450\ kN/m^2$ خاک گسیخته می‌شود.

۳) حداکثر به $\Delta\sigma_d = 450\ kN/m^2$ نیاز داریم.

۴) باتوجه به اینکه در آزمایش CD تنش مؤثر حاکم است، نمی‌توان اظهارنظر کرد.

حل: در آزمایش برش مستقیم برروی این نمونهٔ ماسه‌ای داریم:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c \quad , \quad c = 0 \Rightarrow 450 = 600 \tan\phi + 0 \Rightarrow \tan\phi = \frac{3}{4} \Rightarrow \phi = 37°$$

در قسمت چهارم این فصل یاد گرفتیم که زاویه اصطکاک داخلی به‌دست آمده از آزمایش سه‌محوری، قدری کوچکتر از زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش برش مستقیم است:

$$\phi_{\text{سه‌محوری}} \le \phi_{\text{برش مستقیم}} = 37° \Rightarrow \phi_{max\ \text{سه‌محوری}} = 37°$$

در خاک‌های ماسه‌ای به‌علت زهکشی سریع $\phi' = \phi$ است و در این سؤال می‌توان گفت:

$$\phi'_{max\ \text{سه‌محوری}} = \phi_{max\ \text{سه‌محوری}} = 37°$$

حالا با نوشتن رابطه گسیختگی تنش‌های اصلی در آزمایش CD، با فرم رابطهٔ تمرین قبل خواهیم داشت:

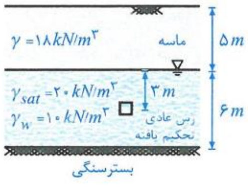
$$\sigma'_1 = \sigma'_3\left(\frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right) + 2c'\left(\frac{\cos\phi'}{1-\sin\phi'}\right) \quad , \quad c' = 0 \Rightarrow \left(\frac{\sigma'_3 + \Delta\sigma_d}{\sigma'_3}\right) = \left(\frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right)$$

به ازای ماکزیمم مقدار ϕ'، حداکثر مقدار $\Delta\sigma_d$ برابر است با:

$$\left(\frac{150 + \Delta\sigma_{d_{max}}}{150}\right) = \left(\frac{1+\sin 37°}{1-\sin 37°}\right) \Rightarrow \Delta\sigma_{d_{max}} = 450\ kN/m^2$$

بنابراین گزینهٔ (۳) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۴۷: در پروفیل شکل زیر، یک نمونهٔ دست نخورده از عمق ۸ متری سطح خاک تهیه شده و در آزمایشگاه تحت آزمایش سه‌محوری CU قرار می‌گیرد. اگر نمونه به ازای تنش همه‌جانبه $200kPa$ با تنش انحرافی $400kPa$ گسیخته شود، در آن‌صورت با نصف شدن تنش همه‌جانبه، زاویه اصطکاک داخلی خاک ... .



۱) برابر $30°$ به‌دست می‌آید.

۲) کمتر از $30°$ به‌دست می‌آید.

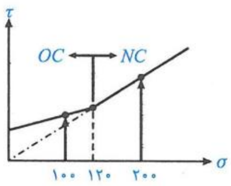
۳) بیشتر از $30°$ به‌دست می‌آید.

۴) هیچ‌کدام

حل: ابتدا بیشترین تنش مؤثری که نمونه در طبیعت تحمل کرده است را به‌دست می‌آوریم که باتوجه به عادی‌تحکیم‌یافته بودن این رس در طبیعت، خواهیم داشت:

$$\sigma'_{\text{طبیعت}} = 18 \times 5 + (20 - 10) \times 3 = 120\ kPa$$

مقدار فوق، تنش پیش‌تحکیمی نمونه به هنگام ترسیم پوش‌گسیختگی است. بنابراین باتوجه به مطالب گفته شده در متن درس (انتهای قسمت چهارم)، پوش‌گسیختگی برای نمونهٔ مذکور به‌صورت زیر خواهد بود:



باتوجه به شکل می‌توان برای دو حالت ذکرشده در صورت سؤال $(\sigma_3 = 200\,kPa \;,\; \sigma_3 = 100\,kPa)$ نوشت:

حالت اول:

نمونهٔ خاک رس به‌صورت عادی‌تحکیم‌یافته بارگذاری می‌شود. $\Leftarrow \quad \sigma_3 = 200\,kPa > 120\,kPa$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2c\,tan(45+\frac{\phi}{2}) \;,\; c=0 \Rightarrow (200+400) = (200)\,tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 0 \Rightarrow \phi = 30^\circ$$

حالت دوم:

نمونهٔ خاک رس به‌صورت پیش‌تحکیم‌یافته بارگذاری می‌شود. $\Leftarrow \quad \sigma_3 = 100\,kPa < 120\,kPa$

در این حالت باتوجه به شکل واضح است که مقدار زاویه اصطکاک داخلی، کمتر از حالت اول (یعنی کمتر از 30°) به‌دست می‌آید.

بنابراین گزینهٔ (۲) درست است.

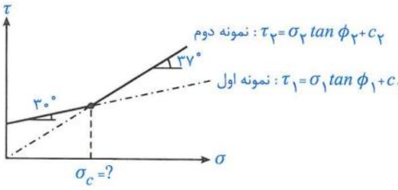
تمرین ۴۸: دو نمونه از یک نوع خاک رس، در شرایط اشباع تحت آزمایش سه‌محوری CU قرار گرفته و پارامترهای مقاومت برشی خاک به‌شرح روبرو حاصل می‌شوند:

	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (kPa)
نمونه اول	۳۰°	۲۲
نمونه دوم	۳۷°	۰

مقدار تنش پیش‌تحکیمی نمونه چند kPa است؟ $(\sqrt{3} = 1/7 \;,\; sin\,37^\circ = 0/6)$

۱) ۳۰ ۲) ۶۰ ۳) ۱۲۰ ۴) هیچ‌کدام

حل: از آنجائی‌که در آزمایش بر روی یک نوع خاک رس، پارامترهای مقاومت برشی متفاوتی حاصل شده است و نیز با توجه به صفر بودن چسبندگی در آزمایش دوم، می‌توان حدس زد در یکی از حالت‌ها (آزمایش اول) $\sigma_3 < \sigma_c$ بوده و نمونه پیش‌تحکیم یافته است ولی در حالت دیگر (آزمایش دوم)، $\sigma_3 > \sigma_c$ بوده و نمونه عادی تحکیم یافته است. بنابراین پوش گسیختگی در این دو حالت به‌صورت زیر است:



$$\begin{cases} \tau_1 = \sigma_1\,tan\,\phi_1 + c_1 \;\Rightarrow\; \tau_1 = \sigma_1\,tan\,30^\circ + 22 \\ \tau_2 = \sigma_2\,tan\,\phi_2 + c_2 \;\Rightarrow\; \tau_2 = \sigma_2\,tan\,37^\circ \end{cases}$$

حالا در نقطهٔ تلاقی دو خط فوق، خواهیم داشت:

$$\tau_2 = \tau_1 \xrightarrow{\sigma_1=\sigma_2=\sigma_c} \sigma_c\,tan\,37^\circ = \sigma_c\,tan\,30^\circ + 22 \;\Rightarrow\; \sigma_c(\frac{3}{4} - \frac{\sqrt{3}}{3}) = 22 \Rightarrow \sigma_c = 120\,kN/m^2 \text{ یا } 120\,kPa$$

تمرین ۴۹: زاویه اصطکاک داخلی برای یک نمونهٔ خاک رس عادی تحکیم یافته در شرایط زهکشی شده، ϕ' است. این رس تحت آزمایش فشاری محدود نشده قرار گرفته و در فشار محوری q_u گسیخته می‌شود. فشار آب حفره‌ای تولید شده در لحظه گسیختگی کدام است؟

۱) $\frac{1}{2} q_u \left[1 - \frac{1}{sin\,\phi'}\right]$ ۲) $q_u \left[1 - \frac{1}{sin\,\phi'}\right]$ ۳) $\frac{1}{2} q_u \left[1 + \frac{1}{sin\,\phi'}\right]$ ۴) $q_u \left[1 + \frac{1}{sin\,\phi'}\right]$

حل: در ابتدای حل این سؤال، رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را با حاکمیت تنش مؤثر برای آزمایش زهکشی نشده می‌نویسیم:

$$(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)(\frac{1+sin\,\phi'}{1-sin\,\phi'}) + 2c'(\frac{cos\,\phi'}{1-sin\,\phi'})$$

در آزمایش فشاری محدود نشده؛ $\sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 = q_u$ است، بنابراین با جایگذاری در رابطهٔ بالا و نیز لحاظ کردن $c' = 0$ (رس عادی تحکیم یافته)، خواهیم داشت:

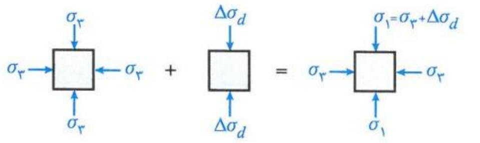
$$(q_u - u_f) = (0 - u_f)\,\frac{1+sin\,\phi'}{1-sin\,\phi'} + 0 \;\Rightarrow\; u_f\,(1 - \frac{1+sin\,\phi'}{1-sin\,\phi'}) = q_u \;\Rightarrow\; u_f\,(\frac{1-sin\,\phi' - 1 - sin\,\phi'}{1-sin\,\phi'}) = q_u$$

$$\Rightarrow\; u_f = (\frac{1-sin\,\phi'}{-2sin\,\phi'})q_u = (-\frac{1}{2sin\,\phi'} + \frac{1}{2})q_u = \frac{1}{2}q_u\,(1 - \frac{1}{sin\,\phi'})$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۵۰: **یک نمونه رس اشباع و عادی‌تحکیم‌یافته، در آزمایش سه‌محوری ابتدا تحت فشار محفظه‌ای $100\ kN/m^2$ تحکیم می‌یابد و سپس شیرهای زهکشی بسته شده و نمونه تحت افزایش تدریجی تنش انحرافی گسیخته می‌شود. اگر زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده به‌ترتیب $\phi' = 25°$ و $\phi = 16°$ باشند، مقاومت تک‌محوری نمونه برحسب kN/m^2 چقدر است؟ ($\sin 25° = 0/42$، $\sin 16° = 0/28$، $\tan^2 53 = 1/77$ و $\tan^2 57/5 = 2/46$)**

● حل: مرحلهٔ دوم هر آزمایش سه‌محوری CU را می‌توان در حکم یک آزمایش تک‌محوری دانست. در مرحلهٔ دوم آزمایش CU درحالیکه شیرهای زهکشی بسته‌اند، نمونه تحت تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ و بدون تنش همه‌جانبه بارگذاری و گسیخته می‌شود.



پس اگر در آزمایش CU مقدار مقاومت تک محوری را بخواهند، کافی است تا $\Delta\sigma_d$ را محاسبه کنیم، بنابراین در حل این مسئله می‌نویسیم:

$$(\sigma_3 + \Delta\sigma_d) = \sigma_3 \tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\phi}{2})$$ و $c = 0$ (رس عادی‌تحکیم‌یافته) و $\Delta\sigma_d = q_u$

$$(100+q_u) = 100\tan^2(45+\frac{16}{2})+0 \Rightarrow q_u = 100\tan^2 53 - 100 = 77\ kN/m^2$$

سؤال: به نظر شما اگر تنش همه جانبهٔ σ_3 در این آزمایش دو برابر شود، q_u چند برابر خواهد شد؟ چرا؟

تمرین ۵۱: **دو نمونه از یک خاک رس اشباع در آزمایش سه‌محوری تحت فشار محفظه‌ای σ_3 تحکیم می‌یابند. سپس نمونه اول تحت شرایط زهکشی نشده با اعمال تنش انحرافی به گسیختگی می‌رسد و مقدار زاویه اصطکاک داخلی آن برابر $30°$ و چسبندگی برابر صفر به‌دست می‌آید. نمونه دوم نیز تحت آزمایش UU با فشار محفظه‌ای $4\ kg/cm^2$ قرار می‌گیرد به‌طوری که با اعمال تنش انحرافی $6\ kg/cm^2$ گسیخته می‌شود. مقدار فشار محفظه‌ای اولیه (σ_3) که دو نمونه تحت آن تحکیم یافتند، کدام است؟**

۱) $6\ kg/cm^2$ ۲) $4\ kg/cm^2$ ۳) $3\ kg/cm^2$ ۴) $1\ kg/cm^2$

● حل: فرض کنید دو نمونه از یک خاک رس اشباع را تحت فشار محفظه‌ای یکسان σ_3 تحکیم داده‌ایم و:

۱- نمونه اول را طی یک آزمایش CU با تنش انحرافی $\Delta\sigma_{d_1}$ به گسیختگی می‌رسانیم.

۲- نمونه دوم را در حالیکه شیرهای زهکشی بسته‌اند، ابتدا تحت تنش همه‌جانبه $\Delta\sigma_3$ قرار داده و سپس با تنش انحرافی $\Delta\sigma_{d_2}$ نمونه گسیخته می‌شود.

چون نمونه اشباع است، پارامتر B اسکمپتون برابر یک بوده و خواهیم داشت: $\Delta u_c = \Delta\sigma_3$

بنابراین به همان میزان که با افزایش تنش همه‌جانبه به تنش کل اضافه می‌شود، به فشار آب حفره‌ای هم اضافه خواهد شد و تنش مؤثر تغییر نخواهد کرد. ثابت ماندن تنش مؤثر در نمونه دوم (نسبت به نمونه اول) به این معنی است که مقاومت نمونه‌ها یکسان بوده و تنش انحرافی آنها باهم برابر است. ($\Delta\sigma_{d_1} = \Delta\sigma_{d_2}$)

در پاسخگویی به این سؤال:

شرایط به گونه‌ای مطرح شده است که نمونه‌های (۱) و (۲) را که در بالا توضیح دادیم، می‌توان به راحتی تشخیص داد. در این حالت کافی است تا از آزمایش UU مربوط به نمونه دوم، $\Delta\sigma_{d_2}$ را محاسبه کرده و با برابر قراردادن آن با $\Delta\sigma_{d_1}$، رابطه گسیختگی تنش‌های اصلی را برای نمونه اول بنویسیم و از آنجا مقدار σ_3 مجهول را به‌دست آوریم:

$$\Delta\sigma_{d_2} = 6\ kg/cm^2 \quad , \quad \Delta\sigma_{d_1} = \Delta\sigma_{d_2} = 6\ kg/cm^2$$

$$(\sigma_3 + \Delta\sigma_{d_1}) = \sigma_3\tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\phi}{2}) \Rightarrow (\sigma_3+6) = \sigma_3\tan^2(45+\frac{30}{2})+0 \Rightarrow \sigma_3 = 3\ kg/cm^2$$

بنابراین گزینهٔ (۳) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۵۲: یک نمونه رسی در شرایط طبیعی تحت فشار مؤثر P می‌باشد. اگر این خاک را تحت آزمایش UU با فشار همه‌جانبه P قرار دهیم، مقدار تنش قائم انحرافی در لحظه گسیختگی برابر $۲P$ خواهد شد. اگر نمونه‌ای از این خاک را تحت آزمایش CU با فشار همه‌جانبهٔ $۰/۵P$ قرار دهیم، تحت چه مقدار تنش قائم انحرافی نمونه گسیخته می‌شود؟ $(۱/۳ = ۲^{۰/۴})$

۱) $۰/۸۴۵P$ ۲) $۱/۶۹P$ ۳) $۱/۳P$ ۴) $۰/۶۵P$

حل: با استفاده از نمونه اول و انجام آزمایش UU برروی آن، مقدار c_u را محاسبه می‌کنیم:

$$c_{u_۱} = \frac{\Delta\sigma_d}{۲} = \frac{۲P}{۲} = P$$

در ابتدای مرحله دوم از آزمایش CU که برروی نمونه دیگری از این خاک انجام می‌شود، داریم:

$$\text{طبیعی } \sigma'_z = P > CU \text{ آزمایش } \sigma'_۳ = ۰/۵P \Rightarrow \sigma' = P > \sigma'_۰ = ۰/۵P \Rightarrow OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_۰} = \frac{P}{۰/۵P} = ۲ > ۱ \Rightarrow \text{ رس } OC \text{ است}$$

چون خاک رسی پیش‌تحکیم‌یافته به حساب می‌آید، بنابراین با استفاده از رابطه اسکمپتون خواهیم داشت:

$$\left(\frac{c_u}{\sigma'_z}\right)_{OC} = \left(\frac{c_u}{\sigma'_z}\right)_{NC} \times OCR^{۰/۸} \Rightarrow \left(\frac{c_{u_۲}}{CU \text{ در آزمایش } \sigma'_۳}\right) = \left(\frac{c_{u_۱}}{\text{در شرایط طبیعی } \sigma'_z}\right) \times OCR^{۰/۸}$$

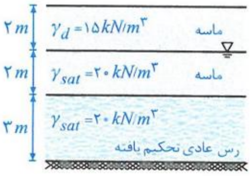
$$\Rightarrow \left(\frac{c_{u_۲}}{۰/۵P}\right) = \left(\frac{P}{P}\right) \times (۲)^{۰/۸} \Rightarrow c_{u_۲} = ۰/۵P \times ۲^{۰/۸} = ۰/۸۴۵P$$

$$(۲^{۰/۴})^۲ = ۱/۳^۲ = ۱/۶۹$$

$$\Delta\sigma_{d_۲} = ۲c_{u_۲} = ۲ \times ۰/۸۴۵P = ۱/۶۹P$$

بنابراین گزینهٔ (۲) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۵۳: در نیمرخ خاک زیر، نمونه‌ای از مرکز لایه رس برداشته شده و تحت آزمایش تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده (CU) قرار می‌گیرد. این نمونه با فشار همه‌جانبه $۲۵kPa$، مقاومت محوری $۶۰kPa$ را از خود نشان می‌دهد. نمونه خاک موردنظر در هنگام گسیختگی چه رفتاری را از خود نشان می‌دهد؟



۱) کاهش حجم
۲) کاهش فشار آب حفره‌ای
۳) افزایش حجم
۴) افزایش فشار آب حفره‌ای

حل: اولاً در آزمایش CU به هنگام گسیختگی، حجم نمونه ثابت است بنابراین گزینه‌های (۱) و (۳) نادرست می‌باشند.
ثانیاً باتوجه به نمودارهای رفتاری خاک‌ها که در قسمت پنجم بررسی شدند، ملاحظه می‌شود که در لحظه گسیختگی، در خاک رس عادی تحکیم‌یافته با افزایش و در خاک رس پیش‌تحکیم‌یافته با کاهش فشار آب حفره‌ای مواجهیم. بنابراین در پاسخ به این سؤال بایستی نسبت پیش‌تحکیمی نمونه (OCR) را در شروع مرحله برش تعیین کنیم:

$$\sigma'_c = \text{در طبیعت } \sigma'_۰ = ۱۵ \times ۲ + (۲۰-۱۰) \times ۲ + (۲۰-۱۰) \times ۱/۵ = ۶۵ \; kN/m^۲$$

$$\sigma'_۰ = \sigma'_۳ = ۲۵ \; kN/m^۲$$

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_۰} = \frac{۶۵}{۲۵} = ۲/۶ > ۱ \Rightarrow$$ خاک رس پیش‌تحکیم‌یافته است و با کاهش فشار آب حفره‌ای مواجه می‌شویم.

تمرین ۵۴: در یک آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته و زهکشی نشده (CU)، مقادیر پارامترهای مقاومت برشی خاک به‌صورت $c = ۰$ و $\phi = ۳۰^\circ$ به‌دست آمده‌اند. قطر نمونه مورد آزمایش $۶cm$ و ارتفاع آن نیز برابر $۱۰cm$ است. چنانچه نمونه تحت بار محوری $F_d = ۱/۸kN$ گسیخته شود و تغییرشکل قائم آن در این لحظه برابر $۱cm$ باشد، در آن‌صورت مقدار تنش همه‌جانبه‌ای که نمونه تحت آن تحکیم یافته، چقدر است؟ $(\pi = ۳)$

حل: برای محاسبه $\Delta\sigma_d$ بایستی F_d را بر مساحت نمونه در لحظه گسیختگی (A) تقسیم کنیم که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \left(\frac{V}{H}\right) = \frac{V_۰ - \Delta V}{H_۰ - \Delta H} = \frac{V_۰\left(۱ - \frac{\Delta V}{V_۰}\right)}{H_۰\left(۱ - \frac{\Delta H}{H_۰}\right)} = A_۰\left(\frac{۱ - \varepsilon_v}{۱ - \varepsilon_l}\right)$$

حال اگر $\Delta V = 0$ باشد، در آن‌صورت با جایگذاری در رابطهٔ صفحهٔ قبل و یا ساده‌تر از آن، با تساوی حجم‌ها خواهیم داشت:

$$V = V_0 \Rightarrow AH = A_0 H_0 \Rightarrow A = A_0 (\frac{H_0}{H})$$

در حل این مسئله باتوجه به اینکه آزمایش، زهکشی نشده است، می‌توان نتیجه گرفت که ΔV به هنگام مرحلهٔ دوم آزمایش (مرحلهٔ اعمال $\Delta\sigma_d$) صفر است، از این رو می‌نویسیم:

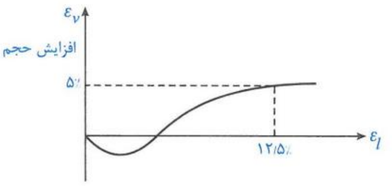
$$A = A_0 (\frac{H_0}{H}) = (\frac{\pi}{4} \times 0/06^2)\left[\frac{0/1}{0/1 - 0/01}\right] = 0/003 m^2$$

$$\Delta\sigma_d = \frac{F_d}{A} = \frac{1/8}{0/003} = 600\ kN/m^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 tan^2\theta + 2c tan\theta \quad , \quad \theta = 45 + \frac{\phi}{2} = 45 + \frac{30}{2} = 60^\circ \quad , \quad c = 0$$

$$\Rightarrow (\sigma_3 + 600) = \sigma_3 tan^2 60 + 0 \Rightarrow \sigma_3 = 300\ kN/m^2$$

تمرین ۵۵: نمونه‌ای از یک خاک ماسه‌ای متراکم با سطح مقطع $20 cm^2$ و ارتفاع $10 cm$، ابتدا تحت فشار همه جانبه $150 kPa$ تحکیم یافته و سپس تحت شرایط زهکشی شده بارگذاری می‌شود، به‌طوری‌که در لحظه گسیختگی ارتفاع آن $1/25 cm$ کاهش می‌یابد. اگر نمودار تغییرات کرنش حجمی به کرنش طولی مطابق شکل باشد، با فرض $\phi' = 30^\circ$ نمونه تحت چه نیروی محوری قائمی (علاوه بر نیروی ناشی از تنش همه جانبه) گسیخته می‌شود؟



۱) $720 N$
۲) $650 N$
۳) $600 N$
۴) $250 N$

حل: ابتدا مساحت نمونه در لحظهٔ گسیختگی را با کمک مطالب گفته شده در تمرین قبل، می‌یابیم:

$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_0 + \Delta V}{H_0 - \Delta H} = \frac{V_0(1 + \frac{\Delta V}{V_0})}{H_0(1 - \frac{\Delta H}{H_0})} = A_0(\frac{1+\varepsilon_V}{1-\varepsilon_l}) = 20 \times (\frac{1 + 0/05}{1 - 0/125}) = 24\ cm^2$$

(علامت + : افزایش حجم داریم؛ علامت − : کاهش ارتفاع داریم)

حال در ادامه با نوشتن رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی در این آزمایش سه محوری (که CD است) خواهیم داشت:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2c' tan(45 + \frac{\phi'}{2}) \quad , \quad c = c' = 0 \quad \text{(خاک ماسه‌ای است)}$$

$$(150 + \Delta\sigma_d) = 150 \times tan^2(45 + \frac{30}{2}) + 0 \Rightarrow \Delta\sigma_d = 300\ kN/m^2$$

و در نهایت مقدا F_d در لحظهٔ گسیختگی برابر است با:

$$F_d = \Delta\sigma_d \times A = (300)(24 \times 10^{-4}) = 0/72\ kN = 720\ N$$

بنابراین گزینه (۱) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۵۶: یک نمونه خاک رس اشباع در دستگاه سه محوری تحت آزمایش CU قرار گرفته و مقاومت فشاری $\sigma_1 = 14\ kg/cm^2$ را از خود نشان می‌دهد. پارامترهای مقاومت برشی به‌دست آمده از این آزمایش به شرح زیر می‌باشند:

$$c = 2\sqrt{2}\ kg/cm^2 \ , \ c' = \sqrt{3}\ kg/cm^2 \ , \ \phi = 20^\circ \ , \ \phi' = 30^\circ$$

اگر نمونه‌ای دیگر از همین خاک را تحت آزمایش سه محوری CD قرار دهیم، در آن‌صورت نمونه در حین گسیختگی با .... حجم مواجه شده و در کل حجم آن در مرحله دوم آزمایش .... می‌یابد. ($tan\ 55^\circ = \sqrt{2}$)

۱) افزایش - کاهش
۲) افزایش - افزایش
۳) کاهش - کاهش
۴) کاهش - افزایش

● حل: برای اظهارنظر در مورد تغییرات حجم این نمونه کافی است دقت کنید که خاک موردنظر یک رس پیش‌تحکیم یافته است (چسبندگی آن مخالف صفر است)، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این نمونه در مرحلهٔ دوم آزمایش CD ابتدا کاهش حجم و سپس افزایش حجم می‌دهد و از این‌رو گزینه‌های (۳) و (۴) که اشاره به کاهش حجم نمونه در لحظهٔ گسیختگی دارند، نادرست هستند.

حال برای اینکه ببینیم در نهایت کاهش حجم نمونه چقدر است، به سراغ فشار آب حفره‌ای آن در لحظهٔ گسیختگی می‌رویم تا از روی علامت u_f در مورد تغییر حجم نهایی نمونه اظهارنظر کنیم. از این‌رو با توجه به مطالب خوانده شدهٔ قبلی می‌نویسیم:

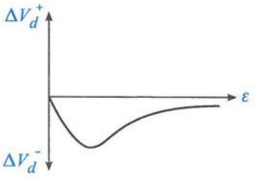
آزمایش CU با حاکمیت تنش کل : $\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45+\frac{\phi}{2})$

$$14 = \sigma_3 \underbrace{\tan^2(45+\frac{20}{2})}_{\tan^2 55^\circ = 2} + 2\times 2\sqrt{2} \times \underbrace{\tan(45+\frac{20}{2})}_{\tan 55^\circ = \sqrt{2}} \Rightarrow \sigma_3 = 3\ kg/cm^2$$

آزمایش CU با حاکمیت تنش مؤثر : $(\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f)\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2})$

$$\Rightarrow (14-u_f) = (3-u_f)\underbrace{\tan^2(45+\frac{30}{2})}_{\tan^2 60^\circ = 3} + 2\times\sqrt{3}\times \underbrace{\tan(45+\frac{30}{2})}_{\tan 60^\circ = \sqrt{3}} \Rightarrow u_f = 0.5\ kg/cm^2 > 0$$

بنابراین در آزمایش CU فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی مثبت است و $OCR < 4$ بوده و نمودار تغییر حجم آن در آزمایش CD نیز به‌صورت زیر است:



یعنی در کل حجم نمونه در مرحلهٔ دوم آزمایش CD کاهش می‌یابد و گزینه (۱) پاسخ درست این تست است.

توجه: چون ضخامت نمونه کم است، بنابراین فشار آب حفره‌ای آن با اضافه فشار آب حفره‌اش یکی است. از این‌رو در لحظهٔ گسیختگی می‌توان گفت:

$u_f = \Delta u_d$

تمرین ۵۷: در یک آزمایش سه‌محوری که برروی یک خاک اشباع انجام می‌شود، به جای اینکه فشار محفظه‌ای به‌صورت همه‌جانبه و یکسان وارد شود، فشار محفظه‌ای در راستای قائم سه برابر مقدار آن در راستای افقی است. اگر نسبت $\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3}$ پس از اعمال فشار محفظه‌ای برابر ۲ باشد، پارامتر A اسکمپتون در این لحظه چقدر است؟

۱) ۰/۵ ۲) ۰/۷۵ ۳) ۰/۲۵ ۴) ۰/۸۵

● حل: براساس رابطه اسکمپتون که در متن درس به آن اشاره شد، می‌نویسیم:

$$\Delta u = B\left[\Delta\sigma_3 + A\left(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3\right)\right] \quad , \quad \Delta\sigma_1 = 3\Delta\sigma_3 \quad , \quad B = 1 \text{ (خاک اشباع)}$$

$$\Rightarrow \Delta u = 1\times\left[\Delta\sigma_3 + A\left(3\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_3\right)\right] = \Delta\sigma_3 + 2A\,\Delta\sigma_3$$

$$\Rightarrow A = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3}\right) - 1\right] = \frac{1}{2}\left[(2) - 1\right] = 0.5$$

توجه کنید که در این سؤال $B \neq \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3}$ است، زیرا تحکیم خاک همسان نمی‌باشد.

تمرین ۵۸: یک نمونه خاک رس اشباع و عادی تحکیم یافته با زاویه اصطکاک داخلی مؤثر $\phi' = 30^\circ$ موجود است. این نمونه در دستگاه سه محوری ابتدا با تنش همه جانبه σ_3 تحکیم می‌یابد و سپس در شرایطی که شیرهای زهکشی بسته‌اند، با تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ گسیخته می‌شود. اگر نمونه به هنگام گسیختگی هیچگونه تغییر شکل جانبی نداشته باشد، در آن‌صورت چگونه می‌توان در مورد σ_3 و $\Delta\sigma_d$ اظهارنظر کرد؟

۱) $\Delta\sigma_d < \sigma_3$ ۲) $\Delta\sigma_d > \sigma_3$

۳) $\Delta\sigma_d = \sigma_3$ ۴) هر سه گزینه قبلی می‌توانند صحیح باشند.

حل: چون نمونه در هنگام گسیختگی هیچگونه تغییرشکل جانبی ندارد، بنابراین $A=1$ بوده و داریم:

$$A=\frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d}=1 \Rightarrow \Delta u_d=\Delta\sigma_d$$

با توجه به اطلاعات صورت سؤال، یک آزمایش CU داریم که با نوشتن رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی در حالت حاکمیت تنش مؤثر برای آن، خواهیم داشت:

$$\begin{cases}(\sigma_1-u_f)=(\sigma_3-u_f)\tan^2(45+\frac{\phi'}{2})+2c'\tan(45+\frac{\phi'}{2})\\ c'=0 \quad \text{(رس عادی تحکیم یافته)}\\ u_f=\Delta u_d \quad \text{(پس‌فشار نداریم)}\end{cases}$$

$$\Rightarrow (\sigma_3+\Delta\sigma_d-\underbrace{\Delta u_d}_{\Delta\sigma_d})=(\sigma_3-\underbrace{\Delta u_d}_{\Delta\sigma_d})\times\tan^2(45+\frac{30}{2})+0 \Rightarrow \sigma_3=(\sigma_3-\Delta\sigma_d)\times 3 \Rightarrow \Delta\sigma_d=\frac{2}{3}\sigma_3<\sigma_3$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۵۹: در یک آزمایش CU برروی نمونه‌ای از رس اشباع و عادی‌تحکیم‌یافته، زاویهٔ اصطکاک داخلی مؤثر نمونه برابر 30° به‌دست آمده است. اگر فشار محفظه‌ای برابر $300\,kN/m^2$ و پس‌فشار برابر $100\,kN/m^2$ باشد، تنش انحرافی لازم برای گسیختگی نمونه در این حالت چقدر است؟ (ضریب فشار آب حفره‌ای A اسکمپتون در لحظهٔ گسیختگی برابر ۰/۵ است.)

حل: ابتدا با استفاده از مقدار A در لحظهٔ گسیختگی مقدار Δu_d را برحسب $\Delta\sigma_d$، در این نمونه می‌یابیم:

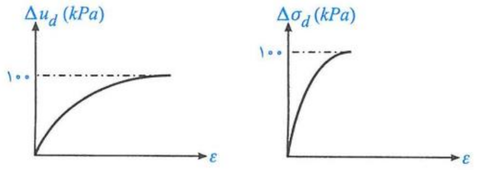
$$A=\frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \Rightarrow 0/5=\frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \Rightarrow \Delta u_d=0/5\,\Delta\sigma_d$$

حال در آزمایش CU رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی با حاکمیت تنش مؤثر را می‌نویسیم (با توجه به داشتن ϕ' در خاک) و فراموش نمی‌کنیم که پس‌فشار و $\sigma_{3\,\text{اولیه}}$ را از این رابطه حذف کنیم:

$$(\sigma_1-u_f)=(\sigma_3-u_f)\tan^2(45+\frac{\phi'}{2})+\underbrace{2c'\tan(45^\circ+\frac{\phi'}{2})}_{\text{صفر}} \quad \text{(در رس عادی تحکیم یافته، } c'=0 \text{ است)}$$

$$(\underbrace{200}_{\sigma_{3\,\text{تحکیمی}}}+\Delta\sigma_d-\underbrace{0/5\Delta\sigma_d}_{\Delta u_d})=(\underbrace{200}_{\sigma_{3\,\text{تحکیمی}}}-\underbrace{0/5\Delta\sigma_d}_{\Delta u_d})\tan^2(45+\frac{30}{2})+0 \Rightarrow \Delta\sigma_d=200\,kN/m^2$$

تمرین ۶۰: در یک آزمایش سه‌محوری CU برروی یک خاک رسی، نمودارهای زیر به‌دست آمده‌اند. کدام عبارت در توصیف تغییرشکل این خاک به هنگام گسیختگی صحیح است؟



۱) فقط تغییرشکل جانبی نمونه صفر است.

۲) فقط تغییرشکل قائم نمونه صفر است.

۳) تغییرشکل جانبی و قائم نمونه، هر دو صفر است.

۴) در این مورد نمی‌توان اظهارنظر دقیقی انجام داد.

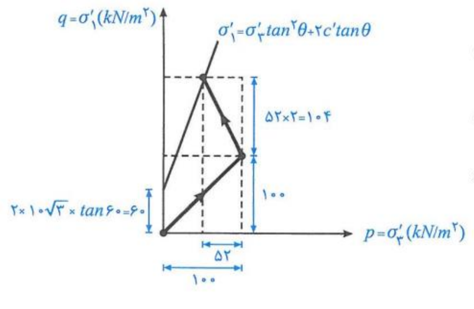
حل: با توجه به نمودارهای رسم شده می‌توان گفت:

$$\Delta u_d=\Delta\sigma_d=100\,kPa \Rightarrow A=\frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d}=1$$

چون $A=1$ شده است، پس می‌توان نتیجه گرفت که تغییرشکل جانبی نمونه صفر است. ولی گزینهٔ (۱) جواب این تست نیست، زیرا در آزمایش CU، تغییر حجم نمونه در مرحلهٔ دوم برابر صفر می‌باشد و با توجه به اینکه تغییرشکل جانبی نیز صفر است، می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع نمونه ثابت بوده و تغییر شکل قائم نیز صفر است، بنابراین گزینهٔ (۳) پاسخ صحیح است.

تمرین ۶۱: پارامترهای مقاومت برشی مؤثر برای یک نمونه خاک برابر $\phi' = 30^\circ$ و $c' = 10\sqrt{3}\ kN/m^2$ می‌باشند. نمونه‌ای از خاک مذکور تحت فشار محفظه‌ای $100\ kN/m^2$ تحکیم داده می‌شود و سپس تنش محوری σ'_1 شروع به افزایش و تنش جانبی σ'_3 شروع به کاهش می‌کند، به‌طوریکه آهنگ تغییرات تنش محوری دوبرابر تنش جانبی است. مسیر تنش را در فضای $p = \sigma'_3$ و $q = \sigma'_1$ رسم کنید.

حل:

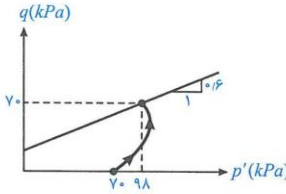


$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2c'\tan(45 + \frac{\phi'}{2})$$

$$(100 + 2\Delta\sigma_d) = (100 - \Delta\sigma_d)\tan^2(45 + \frac{30}{2}) + 2\times 10\sqrt{3}\times\tan(45 + \frac{30}{2})$$

$$\Rightarrow \Delta\sigma_d = 52\ kN/m^2$$

تمرین ۶۲: بر روی یک نمونه خاک رس اشباع آزمایش سه محوری CU انجام می‌شود که مسیر تنش مؤثر در فضای $p' - q$ مطابق شکل زیر است. بعد از تحکیم نمونه در مرحلهٔ اول، در مرحله بعد با ثابت ماندن تنش همه جانبه، تنش محوری افزایش می‌یابد. ضریب فشار آب حفره‌ای اسکمپتون (A) در لحظهٔ گسیختگی کدام است؟ ($q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ و $p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$)



۱) ۰/۲

۲) ۰/۳

۳) ۰/۵

۴) ۰/۶

حل: پس از خاتمه مرحلهٔ اول آزمایش و تحکیم یافتن نمونه، داریم:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma'_1 = \sigma_3 = \sigma'_3 \\ q = 0 \\ p' = \dfrac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = 70\ kPa \end{cases} \Rightarrow \frac{\sigma_3 + \sigma_3}{2} = 70 \Rightarrow \sigma_3 = 70\ kPa$$

در خاتمهٔ مرحله دوم آزمایش و گسیختگی نمونه (در آزمایش زهکشی نشده) نیز خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \sigma'_1 = \sigma_1 - u_f \quad , \quad \sigma'_3 = \sigma_3 - u_f \\ q = \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 70 \Rightarrow \sigma_1 - \sigma_3 = 140 \qquad \Rightarrow \Delta\sigma_d = 140\ kPa \\ p' = \dfrac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = 98 \Rightarrow \sigma'_1 + \sigma'_3 = 196 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sigma_1 - \sigma_3 = 140 \qquad (I) \\ (\sigma_1 - u_f) + (\sigma_3 - u_f) = 196 \Rightarrow \sigma_1 + \sigma_3 = 196 + 2u_f \qquad (II) \end{cases}$$

حالا طرفین رابطهٔ (I) را از دو طرف رابطهٔ (II) کم می‌کنیم تا σ_1 حذف شود:

$$(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3) = (196 + 2u_f) - (140) \Rightarrow 2\sigma_3 = 56 + 2u_f$$

از طرف دیگر مقدار σ_3 را که از مرحلهٔ اول به‌دست آورده بودیم در رابطهٔ بالا قرار داده و u_f را می‌یابیم:

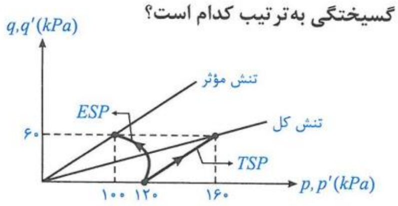
$$2\times 70 = 56 + 2u_f \Rightarrow u_f = 42\ kPa$$

و در نهایت مقدار پارامتر A اسکمپتون در لحظهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر تعیین می‌کنیم:

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} = \frac{42}{140} = 0/3$$

بنابراین گزینه (۲) پاسخ صحیح این تست است.

تمرین ۶۳: بر روی یک نمونه خاک ماسه‌ای آزمایش سه محوری CU با تحکیم همه جانبهٔ نمونه در مرحله اول و سپس افزایش تنش محوری و ثابت ماندن تنش همه جانبه، انجام شده است. اگر مسیر تنش کل (TSP)* در فضای p و q و مسیر تنش مؤثر (ESP)** در فضای p' و q' مطابق شکل زیر باشد، در آن‌صورت زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک و پارامتر A اسکمپتون در لحظهٔ گسیختگی به‌ترتیب کدام است؟



۱) 37° و ۰/۳
۲) 30° و ۰/۵
۳) 30° و ۰/۳
۴) 37° و ۰/۵

حل: در خاتمهٔ مرحله دوم آزمایش CU داریم:

۱- حالت حاکمیت تنش کل و مسیر تنش کل (TSP)

$$\begin{cases} p = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = 160 \\ q = \dfrac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 60 \end{cases} \Rightarrow \sigma_1 = 220\,kPa \quad , \quad \sigma_3 = 100\,kPa$$

۲- حالت حاکمیت تنش مؤثر و مسیر تنش مؤثر (ESP)

$$\begin{cases} p' = \dfrac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = 100 \\ q' = \dfrac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = 60 \end{cases} \Rightarrow \sigma'_1 = 160\,kPa \quad , \quad \sigma'_3 = 40\,kPa$$

حال با توجه به اطلاعات فوق ابتدا ϕ' را می‌یابیم:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3\left(\frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'}\right) + 2c'\left(\frac{\cos\phi'}{1-\sin\phi'}\right) \Rightarrow 160 = 40 \times \frac{1+\sin\phi'}{1-\sin\phi'} + 0 \Rightarrow \sin\phi' = 0/6 \Rightarrow \phi' = 37^\circ$$

و در ادامه با تعیین Δu_d و $\Delta\sigma_d$، پارامتر A اسکمپتون را به‌دست می‌آوریم:

$$\begin{cases} \sigma'_1 = \sigma_1 - u_f \Rightarrow 160 = 220 - \Delta u_d \Rightarrow \Delta u_d = 60\,kPa \\ \Delta\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = 220 - 100 = 120\,kPa \end{cases} \Rightarrow A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} = \frac{60}{120} = 0/5$$

بنابراین گزینهٔ (۴) صحیح است.

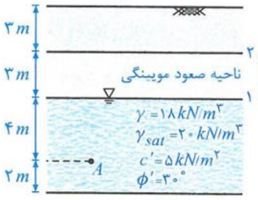
---

* *Total Stress Path* = *TSP* = مسیر تنش کل

** *Effective Stress Path* = *ESP* = مسیر تنش مؤثر

تست‌های فصل هشتم

۱- اگر مطابق شکل زیر آب در اثر موئینگی ۳ متر بالا بیاید، در آن‌صورت مقاومت برشی خاک در نقطه A (در امتداد صفحه افقی) چـه تغییـری خواهد کرد؟



۱) $۶\ kN/m^۲$ از مقاومت برشی خاک کاسته می‌شود.

۲) $۳/۴\ kN/m^۲$ از مقاومت برشی خاک کاسته می‌شود.

۳) $۶\ kN/m^۲$ به مقاومت برشی خاک افزوده می‌شود.

۴) $۳/۴\ kN/m^۲$ به مقاومت برشی خاک افزوده می‌شود.

۲- تنش محفظه‌ای روی یک نمونه ماسه خشک در آزمایش سه‌محوری برابر $۱۰۰kPa$ می‌باشد و صفحه شکست، زاویه $\theta = ۶۰^\circ$ با افق مـی‌سـازد. تنش قائم در صفحه گسیختگی چقدر است؟

۱) $۵۰kPa$ ۲) $۱۰۰kPa$ ۳) $۱۵۰kPa$ ۴) $۲۰۰kPa$

۳- در یک آزمایش سه محوری بر روی خاک ماسه‌ای، تنش برشی در صفحهٔ شکست برابر $۱۰۰ kN/m^۲$ است. تنش‌های اصلی حداقل و حـداکثر به‌ترتیب چند $kN/m^۲$ می‌باشند؟ ($\phi = ۳۰^\circ$)

۱) ۱۰۰ و ۳۰۰ ۲) ۲۰۰ و ۶۰۰ ۳) $۲۰۰\frac{\sqrt{۳}}{۳}$ و $۶۰۰\frac{\sqrt{۳}}{۳}$ ۴) $۱۰۰\frac{\sqrt{۳}}{۳}$ و $۳۰۰\frac{\sqrt{۳}}{۳}$

۴- در یک آزمایش سه محوری، تحت تنش‌های $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$، نمونهٔ خاک با زاویه ۳۰° نسبت به افق گسیخته شده است. اگر مقادیر تنش‌های قـائم و برشی در لحظهٔ گسیختگی روی سطح بریده شده به‌ترتیـب $۳۴۶\ kPa$ و $۱۷۳\ kPa$ انـدازه‌گیـری شـده باشـد، تـنش‌هـای $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ چنـد کیلوپاسکال است؟ (سراسری - ۹۲)

۱) ۴۴۶، ۴۶ ۲) ۶۹۲، ۹۲ ۳) ۸۹۲، ۹۲ ۴) ۸۴۴، ۴۶

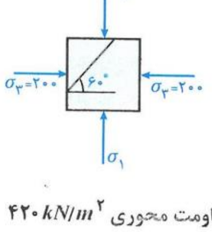
۵- در آزمایش سه‌محوری، یک نمونهٔ ماسه‌ای تحت تنش همه‌جانبه σ قرار گرفته و با افزایش تنش انحرافی به میزان ۲σ گسیخته می‌شود. اگـر این آزمایش را با همان تنش همه‌جانبه ولی این بار با کاهش تنش قائم تکرار کنیم، در آن‌صورت میزان کاهش تنش قائم چقدر باشد تـا نمونـه گسیخته شود؟

۱) σ ۲) $\frac{۲}{۳}\sigma$ ۳) $\frac{۱}{۲}\sigma$ ۴) $\frac{۱}{۳}\sigma$

۶- در یک آزمایش بارگذاری، مقدار تنش اصلی حداکثر برابر $۸۰kPa$ است و تنش برشی در صفحه گسیختگی برابر $۱۰\sqrt{۳}\ kPa$ اندازه‌گیری شده است. اگر زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر ۳۰° باشد، مقدار تنش اصلی حداقل چند kPa خواهد بود؟

۱) صفر ۲) ۲۰ ۳) ۴۰ ۴) ۸۰

۷- تنش محفظه‌ای (σ_{cell}) روی یک نمونه ماسه خشک در آزمایش سه‌محوری برابر $۲۰۰kPa$ می‌باشد. صفحه شکست زاویـه $\theta = ۶۰^\circ$ بـا افـق می‌سازد. تنش‌ها در صفحه برش درحالت گسیختگی مساوی است با: (برحسب کیلوپاسکال) (سراسری - ۷۴)



۱) $\sigma_f = ۳۰۰$ و $\tau_f = ۱۰۰\sqrt{۳}$

۲) $\sigma_f = ۲۰۰$ و $\tau_f = ۱۰۰$

۳) $\sigma_f = ۴۰۰$ و $\tau_f = ۲۰۰$

۴) $\sigma_f = ۶۰۰$ و $\tau_f = ۱۰۰\sqrt{۳}$

۸- ضرایب مقاومت برشی یک نمونه خاک عبارتند از: $\phi' = ۳۰^\circ$ و $c' = ۲۰\sqrt{۳}\ kN/m^۲$. برای اینکه این نمونه خاک مقاومت محوری $۴۲۰\ kN/m^۲$ از خود نشان دهد، چه تنش جانبی باید بر آن وارد آید؟ (سراسری-۷۷)

۱) $\sigma_۳ = ۵۰kPa$ ۲) $\sigma_۳ = ۱۰۰kPa$ ۳) $\sigma_۳ = ۱۵۰kPa$ ۴) $\sigma_۳ = ۲۰۰kPa$

۹- ضرایب مقاومت برشی مؤثر یک نمونه خاک برابر $\phi' = 30^\circ$ و $c' = 20\sqrt{3}\ kN/m^2$ می‌باشند. نمونه‌ای اشباع از همین خاک در دستگاه سه‌محوری تحت فشار محفظه‌ای $121\ kN/m^2$ تحکیم داده می‌شود و آنگاه با ثابت نگه داشتن $\sigma'_1 = 121\ kN/m^2$، تنش جانبی σ'_3 به آرامی کاهش داده می‌شود. به ازای کدام σ'_3 (فشار محفظه‌ای) نمونه گسیخته می‌گردد؟ (سراسری - ۸۱)

۱) $0/3\ kN/m^2$
۲) حتی اگر $\sigma'_3 = 0$ گردد، نمونه گسیخته نمی‌شود.
۳) نمونه به ازای $60\sqrt{3}\ kN/m^2$ گسیخته می‌شود.
۴) نمونه، قبلاً تحت فشار محفظه‌ای $121\ kN/m^2$ گسیخته می‌گردد.

۱۰- برروی نمونه خاکی دو آزمایش برش مستقیم انجام شده که نیروهای اعمالی قائم و افقی به‌ترتیب در آزمایش اول $F_v = 8kg$ و $F_h = 6kg$ و در آزمایش دوم $F_v = 12kg$ و $F_h = 9kg$ می‌باشند. اگر ابعاد افقی دستگاه 5×5 سانتی‌متر و ارتفاع آن ۴ سانتی‌متر باشد، چسبندگی c و زاویه اصطکاک داخلی ϕ چقدر است؟ $(\sin 53^\circ = 0/8)$ (سراسری - ۷۹)

۱) $c = 0$ و $\phi = 37^\circ$
۲) $c = 0/1\ kg/cm^2$ و $\phi = 30^\circ$
۳) $c = 0$ و $\phi = 30^\circ$
۴) $c = 0/1\ kg/cm^2$ و $\phi = 37^\circ$

۱۱- نمونه‌ای به قطر ۶۰ میلی‌متر را تحت آزمایش برش مستقیم قرار داده و پس از اعمال بار قائم ۳۶ کیلوگرمی، نیروی افقی T به‌تدریج به آن اعمال می‌شود. اگر مقاومت برشی خاک در صفحه گسیختگی (براساس بار قائم وارده) برابر ۱/۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع باشد، آنگاه نیروی افقی T که باعث گسیختگی نمونه می‌شود برابر چند کیلوگرم خواهد بود؟ $(\pi = 3)$

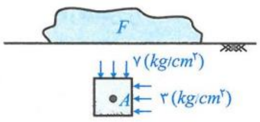
۱) ۳۲/۴
۲) ۶۴/۸
۳) ۱۲۹/۶
۴) ۳۴/۲

۱۲- در تست قبل، تنش قائم در صفحه گسیختگی و زاویهٔ گسیختگی با راستای افقی، به ترتیب چند کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و چند درجه می‌باشند؟ $(\pi = 3$ و $\phi = 30^\circ)$

۱) ۱/۳۳و صفر
۲) ۱/۳۳و ۶۰
۳) ۰/۷ و ۶۰
۴) ۰/۷ و صفر

۱۳- در اثر بارگذاری در سطح زمین تنش‌های اصلی ایجاد شده در المان نشان داده شده در نقطه A مطابق شکل می‌باشد. اگر نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌هایی از خاک محل مطابق جدول زیر باشد، ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی برشی در صفحه‌ای که با زاویه ۴۵ درجه از نقطه A می‌گذرد، کدام است؟ (سراسری - ۸۹)

تنش برشی (kg/cm^2)	۲/۶	۲	τ
تنش قائم (kg/cm^2)	۴	۳	σ



۱) ۱/۷
۲) ۱/۶
۳) ۱/۵
۴) ۱/۸

۱۴- در آزمایش سه‌محوری CD مقدار $\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ در شروع آزمایش برشی و در خاتمه، هنگام گسیختگی، برابر است با: (نمونه رس عادی تحکیم‌یافته است.) (سراسری - ۷۳)

۱) در شروع $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 1$ و در خاتمه $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$
۲) در شروع $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0$ و در خاتمه $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$
۳) در شروع $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 1$ و در خاتمه $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2})$
۴) در شروع $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 1$ و در خاتمه $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 1 + \sin\phi$

۱۵- کدام عبارت در مورد یک خاک دانه‌ای که متشکل از مخلوط شن و قلوه سنگ می‌باشد و تحت آزمایش سه‌محوری CD قرارگرفته، صحیح است؟ (سراسری - ۸۴)

۱) با افزایش فشار جانبی در آزمایش سه‌محوری CD، زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد.
۲) با افزایش فشار جانبی در آزمایش سه‌محوری CD، زاویه اصطکاک داخلی تغییری نمی‌کند.
۳) با افزایش فشار جانبی در آزمایش سه‌محوری CD، زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد.
۴) افزایش فشار جانبی در آزمایش سه‌محوری CD، باعث افزایش حجم بیشتر نمونه در حین برش می‌شود.

۱۶- خاکی با $\phi' = 30^\circ$ و $c' = 0/3\ kg/cm^2$ در آزمایش سه‌محوری CD تحت فشار همه‌جانبه $1\ kg/cm^2$ قرار گرفته است. تنش انحرافی در لحظه گسیختگی و زاویهٔ صفحه گسیختگی نسبت به راستای افقی به‌ترتیب چند کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و چند درجه است؟ $(\sqrt{3} = 1/7)$

۱) ۳/۰۲ , ۳۰
۲) ۴/۰۲ , ۳۰
۳) ۳/۰۲ , ۶۰
۴) ۴/۰۲ , ۶۰

۱۷- برای خاکی در آزمایش سه‌محوری CD، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به‌ترتیب برابر ۳۰° و $\frac{\sqrt{۳}}{۲} kg/cm^۲$ به‌دست آمده‌اند. اگر این خاک تحت فشار محفظه‌ای $\sigma_۳ = ۴/۸\ kg/cm^۲$ تحکیم یابد و با ثابت نگه داشتن فشار افقی از فشار قائم کاسته شود، در آن‌صورت تحت چه فشار قائمی خاک گسیخته خواهد شد؟

۱) $۰/۶\ kg/cm^۲$ ۲) $۰/۸\ kg/cm^۲$ ۳) $۱/۶\ kg/cm^۲$ ۴) $۲/۸\ kg/cm^۲$

۱۸- در آزمایش سه‌محوری CD برروی نمونه‌ای از خاک رس عادی تحکیم‌یافته، تنش محفظه‌ای محدود کننده را دو برابر می‌کنیم. در این حالت زاویه اصطکاک داخلی خاک نسبت به حالت اول ... .

۱) دوبرابر می‌شود.
۲) نصف می‌شود.
۳) ممکن است بیشتر یا کمتر شود ولی مقدار دقیق آن را نمی‌توان تعیین کرد.
۴) تغییر نمی‌کند.

۱۹- یک نمونه رس عادی‌تحکیم‌یافته (NC) در آزمایش سه‌محوری CD تحت فشار جانبی $۱۵۰\ kN/m^۲$ و تفاوت تنش $۳۰۰\ kN/m^۲$ به گسیختگی می‌رسد. اگر نمونه‌ای از همین خاک در آزمایش دیگری تحت فشار جانبی $۲۵۰\ kN/m^۲$ قرار گیرد، تفاوت تنش در لحظه گسیختگی برحسب $kN/m^۲$ و زاویه تقریبی سطح گسیختگی با افق برحسب درجه چه خواهد بود؟ (سراسری - ۸۵)

۱) ۴۵۰ و ۶۰ ۲) ۴۵۰ و ۷۵ ۳) ۵۰۰ و ۶۰ ۴) ۵۰۰ و ۷۵

۲۰- یک نمونه خاک ماسه‌ای شل در آزمایش سه‌محوری CD تحت اثر فشار همه‌جانبه $۶۰\ kN/m^۲$ و تنش انحرافی $۱۲۰\ kN/m^۲$ دچار گسیختگی می‌شود. اگر نمونه‌ای از این خاک در آزمایش برش مستقیم تحت اثر تنش قائم $۵۰\ kN/m^۲$ قرار داده شود، با فرض یکسان بودن نتایج دو آزمایش، ماکزیمم تنش برشی قابل تحمل برای خاک در آستانه گسیختگی برابر است با:

۱) $۲۸/۹\ kN/m^۲$ ۲) $۱۷/۷\ kN/m^۲$ ۳) $۱۶/۷\ kN/m^۲$ ۴) $۸/۳\ kN/m^۲$

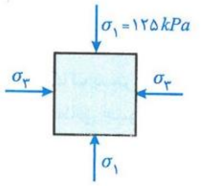
۲۱- در آزمایش سه محوری بدون زهکشی روی ماسه اشباع، تنش انحرافی در هنگام گسیختگی معادل تنش همه‌جانبه به‌دست آمده است. در آزمایش جدید روی همان ماسه چنانچه تنش همه جانبه را دو برابر نماییم، تنش انحرافی جدید در هنگام گسیختگی چند برابر تنش انحرافی گسیختگی آزمایش اول است؟ (سراسری - ۸۹)

۱) چهار برابر ۲) دو برابر ۳) سه برابر ۴) یک برابر

۲۲- نمونه خاک رسی با $c' = ۰$ و $\phi' = ۳۰^\circ$ مفروض است. آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده (CU) با فشار سلولی $\sigma_۳ = ۱۲۰\ kN/m^۲$ انجام شده است. اگر تنش تفاضلی گسیختگی $\Delta\sigma_d$ با فشار سلولی برابر باشد، فشار آب حفره‌ای آن چند $kN/m^۲$ است؟ (سراسری - ۸۰)

۱) ۲۰ ۲) ۳۰ ۳) ۴۰ ۴) ۶۰

۲۳- تنش‌های کل وارد به یک جزء از خاک مطابق شکل نشان داده شده است. درصورتی‌که $\phi' = ۳۰^\circ$، $c' = ۸\ kPa$ باشد و فشار آب حفره‌ای موجود در المان برابر $U = ۳۲\ kPa$ باشد، حداقل تنش جانبی ($\sigma_۳$) برای رسیدن به گسیختگی برابر چند کیلوپاسکال (kPa) است؟ (سراسری - ۹۳)



۱) ۲۲
۲) ۳۲
۳) ۵۴
۴) ۸۶

۲۴- خاک ماسه‌ای با $\phi' = ۳۰^\circ$ تحت آزمایش سه‌محوری بدون زهکشی با تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و تنش تفاضلی (تفاوت تنش) در هنگام گسیختگی نیز برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شده است. فشار آب حفره‌ای در هنگام گسیختگی چند kPa است؟ (سراسری - ۸۳)

۱) ۲۶ ۲) ۵۲ ۳) ۲۵ ۴) ۵۰

۲۵- ضرایب مقاومت برشی مؤثر یک نوع خاک برابر $\phi' = ۳۰°$ و $c' = ۲۵\sqrt{۳}\ kN/m^۲$ می‌باشند. نمونه‌ای از خاک مذکور تحت تنش همه‌جانبه $۳۰۰\ kN/m^۲$ تحکیم داده شده و آنگاه تنش محوری ($\sigma'_۱$) شروع به افزایش و تنش جانبی ($\sigma'_۳$) شروع به کاهش می‌نماید بطوریکه آهنگ تغییرات هر دو تنش $\sigma'_۱$ و $\sigma'_۳$ یکسان است. مقادیر $\sigma'_۱$ و $\sigma'_۳$ در موقع گسیختگی به‌ترتیب چه مقدار خواهند بود؟ (برحسب $kN/m^۲$) (سراسری - ۷۸)

۱) $\sigma'_۱ = ۴۷۶/۵$ و $\sigma'_۳ = ۱۲۳/۵$ ۲) $\sigma'_۱ = ۴۸۷/۵$ و $\sigma'_۳ = ۱۱۲/۵$ ۳) $\sigma'_۱ = ۴۸۷/۵$ و $\sigma'_۳ = ۱۲۳/۵$ ۴) $\sigma'_۱ = ۴۷۶/۵$ و $\sigma'_۳ = ۱۱۲/۵$

۲۶- صفر بودن زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش UU به دلیل ....

۱) نبودن اصطکاک در خاک است. ۲) چسبندگی زیاد خاک است. ۳) کم بودن رطوبت در خاک است. ۴) اشباع بودن خاک است.

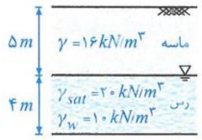
۲۷- در یک آزمایش سه محوری از نوع UU بر روی یک نمونه خاک اشباع، فشار همه جانبهٔ $۰/۱MPa$ اعمال شده و تنش کل قائم در هنگام گسیختگی نمونه $۰/۳۵MPa$ بوده است. در صورتی‌که در آزمایشی دیگر از همین نوع (UU) نمونه در تنش کل قائم $۰/۵۰MPa$ گسیخته شده باشد، تنش همه جانبه هنگام گسیختگی بر حسب مگاپاسکال و زاویهٔ گسیختگی نمونه نسبت به افق چقدر خواهد بود؟ (سراسری - ۹۳)

۱) ۰/۱۵ و °۴۵ ۲) ۰/۲۵ و °۴۵ ۳) ۰/۲۵ و $۴۵-\frac{\phi}{۲}$ ۴) ۰/۲۵ و $۴۵+\frac{\phi}{۲}$

۲۸- در آزمایش سه‌محوری UU برروی یک نمونه رس اشباع به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر، نمونه تحت فشار همه‌جانبه $۱/۵\ kg/cm^۲$ و بار محوری اضافه $۴۸kg$، $۱cm$ کاهش ارتفاع داده و گسیخته می‌شود. مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (c_u) چقدر است؟ ($\pi = ۳$)

۱) $۰/۱۵\ kg/cm^۲$ ۲) $۰/۳\ kg/cm^۲$ ۳) $۰/۴۵\ kg/cm^۲$ ۴) $۰/۶\ kg/cm^۲$

۲۹- یک لایه رسی عادی‌تحکیم‌یافته به ضخامت ۴ متر مطابق شکل روبرو مفروض است. اگر نشانه خمیری رس $PI = ۴۰$ باشد، مقاومت برشی زهکشی نشده در وسط لایه رسی برابر کدام‌یک از مقادیر زیر است؟



۱) $۵۱/۶\ kN/m^۲$ ۲) $۲۵/۸\ kN/m^۲$ ۳) $۳۰/۶\ kN/m^۲$ ۴) $۱۵/۳\ kN/m^۲$

۳۰- برای یک رس عادی‌تحکیم‌یافته مقدار $\phi' = ۳۰°$ از آزمایش سه‌محوری زهکشی شده به‌دست آمده است. نمونه‌ای از همین رس در آزمایش فشاری محدود نشده تحت فشار محوری $q_u = ۶۰kPa$ گسیخته شده است. در لحظه گسیختگی میزان فشار آب منفذی تولید شده چند kPa بوده است؟ (سراسری - ۷۹)

۱) -۴۱ ۲) -۳۰ ۳) صفر ۴) ۶۰

۳۱- پارامترهای مقاومت برشی یک خاک چسبنده در شرایط زهکشی نشده $\phi = ۲۰°$ و $c = ۳۰\ kN/m^۲$ می‌باشند. مقاومت برشی زهکشی نشده این خاک تحت آزمایش تک‌محوری کدام است؟ ($\tan ۵۵° = ۱/۴$, $\tan ۲۰° = ۰/۳۶$)

۱) $۲۱/۶\ kN/m^۲$ ۲) $۳۰\ kN/m^۲$ ۳) $۴۲\ kN/m^۲$ ۴) $۸۴\ kN/m^۲$

۳۲- مقدار چسبندگی و مقاومت تک‌محوری در آزمایش تک‌محوری روی یک نمونه خاک عبارتست از $c = ۱kg/cm^۲$ ، $q_u = ۲\sqrt{۳}\ kg/cm^۲$. اگر یک نمونه از این خاک تحت آزمایش سه‌محوری با تنش همه‌جانبه $۱kg/cm^۲$ قرار گیرد، تنش انحرافی در لحظه گسیختگی نمونه چند $kg/cm^۲$ می‌باشد؟ $\sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲(۴۵° + \frac{\phi}{۲}) + ۲c\tan(۴۵° + \frac{\phi}{۲})$ (سراسری-۸۶)

۱) $۳ + ۲\sqrt{۳}$ ۲) $۲(۱ + \sqrt{۳})$ ۳) $۱ + \sqrt{۳}$ ۴) $۲(\sqrt{۳} - ۱)$

۳۳- یک سد بتنی به وزن ۱۰ هزار تن در متر طول بر روی یک بستر نفوذناپذیر احداث شده است. زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی قاعدهٔ این سد با خاک بستر به ترتیب ۴۲ درجه و صفر می‌باشند. چنانچه نتایج آزمایشات برش مستقیم زهکشی نشده بر روی نمونه‌هایی از خاک بستر مطابق جدول زیر بوده و در محل احتمال وقوع زلزله‌ای با شتاب $۰/۳g$ وجود داشته باشد، حداکثر ارتفاع قابل ذخیره آب در پشت این سد به نحوی که در هیچ شرایطی ضریب اطمینان آن در مقابل لغزش کمتر از ۲ نشود، بر حسب متر کدام است؟ (توجه: از اثر زلزله بر آب صرفنظر نمایید و $\tan ۴۲° = ۰/۹$) (سراسری - ۹۱)

تنش برشی ($kg/cm^۲$)	۵/۱	۳/۴	τ
تنش قائم ($kg/cm^۲$)	۶	۴	σ
فشار منفذی ($kg/cm^۲$)	۲	۱	u

۱) ۵۰
۲) ۷۵
۳) ۱۲۵
۴) ۱۰۰

۳۴- در یک نمونه خاک رس عادی تحکیم یافته، با کدام‌یک از رفتارهای زیر در مرحلهٔ دوم آزمایش سه محوری CU مواجه می‌شویم؟

۱) ابتدا کاهش و سپس افزایش فشار آب حفره‌ای
۲) ابتدا افزایش و سپس کاهش فشار آب حفره‌ای
۳) همواره با کاهش فشار آب حفره‌ای مواجه می‌شویم
۴) همواره با افزایش فشار آب حفره‌ای مواجه می‌شویم

۳۵- کدام‌یک از عبارات زیر نادرست است؟

۱) از بین رفتن مقاومت خاک‌های رسی در اثر به هم خوردگی، حساسیت نامیده می‌شود.
۲) از بین رفتن مقاومت خاک‌های رسی در اثر به هم خوردگی، به علت از بین رفتن بافت طبیعی ذرات آن است که در اثر فرآیند رسوب‌گذاری حاصل شده‌اند.
۳) در خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته مقاومت برشی زهکشی نشده با افزایش فشار سربار مؤثر کاهش می‌یابد.
۴) کسب مقاومت از دست رفته خاک‌های رسی با گذشت زمان تیکسوتروپی نامیده می‌شود.

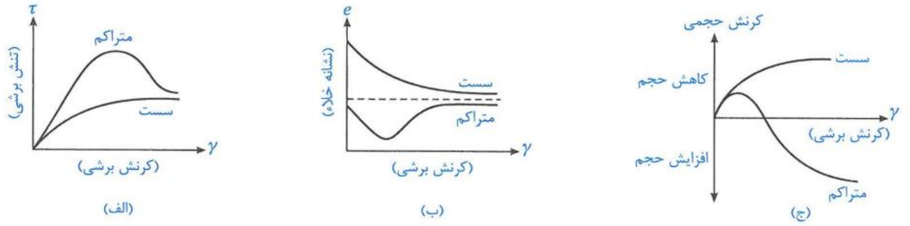
۳۶-یک نمونه ماسهٔ متراکم در دستگاه آزمایش برش مستقیم با اعمال بار افقی به گسیختگی می‌رسد. در حین گسیختگی با .... مواجه می‌شویم.

۱) افزایش مقاومت برشی
۲) کاهش حجم
۳) روانگرایی
۴) افزایش حجم

۳۷- باتوجه به اینکه خاک نمونه A رس عادی‌تحکیم‌یافته و نمونه B رس پیش‌تحکیم‌یافته با درجه پیش‌تحکیمی $(OCR = ۶)$ می‌باشد، کدامیک از جملات ذیل وضعیت صحیح را در لحظه گسیختگی خاک مورد آزمایش بیان می‌کند؟ (نمونه‌ها اشباع هستند) (سراسری - ۷۹)

۱) خاک B در آزمایش CD با افزایش حجم و در آزمایش CU با کاهش حجم روبه‌رو خواهد بود.
۲) خاک A در آزمایش CD با افزایش حجم و در آزمایش CU با افزایش فشار آب حفره‌ای روبه‌رو خواهد بود.
۳) خاک A در آزمایش CD با کاهش فشار آب حفره‌ای و در آزمایش CU با افزایش فشار آب حفره‌ای روبه‌رو خواهد شد.
۴) خاک B در آزمایش CD با افزایش حجم و در آزمایش CU با کاهش فشار آب حفره‌ای روبه‌رو خواهد بود.

۳۸- کدام‌یک از نمودارهای زیر در رابطه با رفتار خاک ماسه‌ای در دو حالت متراکم و سست درست است؟ (سراسری - ۸۲)

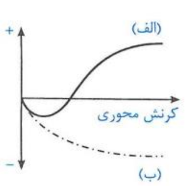


۱) فقط الف و ج
۲) فقط ب و الف
۳) هر سه
۴) فقط الف

۳۹-کدام عبارت درمورد رفتار یک خاک ماسه‌ای متراکم اشباع که تحت فشار جانبی (σ_3) نسبتاً کم در آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی‌شده (CD) و یا تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده (CU) قرار گرفته است، صحیح می‌باشد؟ این نمونه با افزایش تنش به گسیختگی می‌رسد. (سراسری - ۷۷)

۱) در حین آزمایش CU فشارآب حفره‌ای ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند و حجم نمونه ثابت می‌ماند.
۲) در حین آزمایش CD مقاومت برشی نمونه پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود ثابت مانده و نمونه حین گسیختگی منقبض می‌شود.
۳) در حین آزمایش CD حجم ثابت می‌ماند و مقاومت برشی نمونه پس از رسیدن به مقدار حداکثر کاهش می‌یابد.
۴) در آزمایش CU نمونه متورم شده و مقاومت برشی آن پس از رسیدن به مقدار حداکثر، دوباره کاهش می‌یابد.

۴۰- در نمودار زیر، مربوط به آزمایش سه‌محوری روی نمونه‌های خاک، کدام گزینه صحیح است؟ (سراسری - ۷۶)



۱) در تست (CD) الف: تغییر حجم در ماسه متراکم، ب: تغییرفشار منفذی در رس فوق‌تحکیم
۲) در تست (CU) الف: تغییرفشار منفذی در ماسه متراکم، ب: تغییرحجم در رس با تحکیم معمولی
۳) در تست (CU) الف: تغییرحجم در ماسه سست، ب: تغییرفشار منفذی در رس فوق‌تحکیم
۴) در تست (CD) الف: تغییرحجم در رس فوق تحکیم، ب: تغییرحجم نمونه ماسه سست

۴۱- یک نمونه رس پیش‌تحکیم‌یافته ($OCR = ۱۰$) پس از تحکیم در دستگاه سه‌محوری در شرایط زهکشی نشده با اعمال بار محوری به گسیختگی می‌رسد. این نمونه ....

۱) در طول آزمایش سه‌محوری حجمش ثابت می‌ماند.
۲) در لحظه گسیختگی با کاهش حجم مواجه می‌شود.
۳) درطول آزمایش سه‌محوری، همواره با افزایش فشار آب حفره‌ای مواجه می‌شود.
۴) در حین گسیختگی با کاهش فشار آب حفره‌ای مواجه می‌شود.

۴۲-دو نمونه از یک نوع خاک ماسه‌ای ($G_s = ۲/۵$) یک بار به‌صورت متراکم و بار دیگر به‌صورت شل، تحت آزمایش برش مستقیم قرار می‌گیرند. اگر نسبت تخلخل نمونه متراکم در هنگام گسیختگی برابر $e = ۰/۵$ باشد، در آن‌صورت وزن مخصوص خشک نمونه شل در لحظه گسیختگی کدام است؟

۱) $۱/۵ \ t/m^۳$　۲) $۱/۶۷ \ t/m^۳$　۳) $۱/۷۶ \ t/m^۳$　۴) نمی‌توان تعیین کرد.

۴۳- اگر ساخت سریع یک سازه برروی یک شیب خاکی از رس اشباع مدنظر باشد، در آن‌صورت کنترل پایداری شیب براساس پارامترهای مقاومت برشی به‌دست آمده از کدام آزمایش انجام می‌شود؟

۱) CU　۲) CD　۳) UU　۴) UC

۴۴-برای بررسی پایداری بلندمدت یک شیروانی خاکی از رس اشباع، از نتایج کدام آزمایش سه‌محوری می‌توان استفاده کرد؟

۱) فقط CD　۲) فقط CU　۳) فقط UU　۴) CD یا CU

۴۵- در یک آزمایش تحکیم‌یافته زهکشی نشده (CU) برروی رس اشباع عادی‌تحکیم‌یافته، فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی $۲۰۰ \ kN/m^۲$ اندازه‌گیری شده است. اگر فشار جانبی ($\sigma_۳$) برابر $۳۰۰ \ kN/m^۲$، پس‌فشار $۵۰ \ kN/m^۲$ و تفاوت تنش در لحظه گسیختگی $۲۰۰ \ kN/m^۲$ باشد، زاویه اصطکاک داخلی برحسب تنش مؤثر در این نمونه چقدر است؟

۱) ۱۵°　۲) ۳۰°　۳) ۴۵°　۴) ۶۰°

۴۶- در یک آزمایش سه‌محوری CU برروی نمونه‌ای از رس اشباع با نسبت پیش‌تحکیمی بالا ($OCR = ۲۰$) و عدم استفاده از پس‌فشار، کدام عبارت صحیح است؟

۱) چسبندگی زهکشی‌نشده بزرگتر از چسبندگی زهکشی‌شده به‌دست می‌آید.
۲) چسبندگی زهکشی‌نشده کوچکتر از چسبندگی زهکشی‌شده به‌دست می‌آید.
۳) چسبندگی زهکشی نشده برابر با چسبندگی زهکشی‌شده به‌دست می‌آید.
۴) نمی‌توان بطور دقیق اظهارنظر کرد.

۴۷- ضریب B فشار آب منفذی خاکهای رسی (رابطه $Skempton$) با افزایش درجه اشباع .... (سراسری - ۸۳)

۱) افزایش می‌یابد.　۲) تغییر نمی‌نماید.
۳) کاهش می‌یابد.　۴) با درجه پیش‌تحکیمی کاهش می‌یابد.

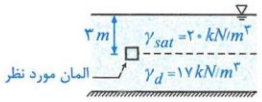
۴۸- در یک آزمایش سه‌محوری در یکی از مراحل کنترل ضریب اشباع B خاک قبل از مرحله تحکیم، بلافاصله پس از یک مرحله افزایش فشار همه‌جانبه، ضریب اشباع کمی بیشتر از ۱ به‌دست آمده است. کدام عبارت صحیح است؟ (تمام سیستم‌های اندازه‌گیری فشار، کنترل شده‌اند و درست کار می‌کنند.) (سراسری - ۸۸)

۱) وجود حبابهای هوا عامل این موضوع است.
۲) در این مرحله از افزایش فشار غشاء نمونه سوراخ شده است.
۳) حتماً در انجام محاسبات اشتباه شده و این موضوع غیرممکن است.
۴) بافت خاک مورد آزمایش به نوعی است که باعث رخ دادن این موضوع شده و می‌توان آزمایش را با روند معمول ادامه داد.

۴۹-برروی یک نمونه خاک رس اشباع و عادی‌تحکیم‌یافته، آزمایش سه‌محوری CU با فشار همه‌جانبه $۲۵۰ \ kN/m^۲$ انجام می‌شود و پارامتر A اسکمپتون در لحظه گسیختگی برابر $A_f = ۰/۷۵$ به‌دست می‌آید. اگر تفاوت تنش‌ها در هنگام گسیختگی برابر $۲۰۰ \ kN/m^۲$ باشد، در آن‌صورت مقاومت برشی این خاک در صفحه گسیختگی در شرایط زهکشی شده کدام است؟ (برحسب $kN/m^۲$)

۱) $۵۰\sqrt{۳}$　۲) ۱۰۰　۳) $۱۰۰\sqrt{۳}$　۴) ۲۰۰

۵۰- تنش افقی کل وارد بر یک المان خاک رس اشباع که در عمق ۳ متری قرار دارد، $۴۰\ kN/m^۲$ است. اگر ضریب فشار منفذی را $A = ۰/۷۵$ درنظر بگیریم، میزان کاهش فشار منفذی این المان خاک، بعد از آن‌که از زمین بیرون آورده شود کدام است؟



۱) $۵۵\ kN/m^۲$
۲) $۲۵\ kN/m^۲$
۳) $۶۵\ kN/m^۲$
۴) $۴۸/۲۵\ kN/m^۲$

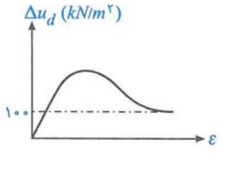
۵۱- یک نمونه رس اشباع در آزمایش سه‌محوری تحت فشار محفظه‌ای $۳۰۰\ kN/m^۲$ و پس‌فشار $۱۵۰\ kN/m^۲$ تحکیم می‌یابد. سپس شیرهای زهکشی بسته شده و فشار همه‌جانبه به $۵۰۰\ kN/m^۲$ افزایش داده می‌شود. اگر در همین شرایط با اعمال تنش انحرافی $۲۰۰\ kN/m^۲$ نمونه به گسیختگی برسد و فشار آب حفره‌ای در لحظه گسیختگی $۴۶۸\ kN/m^۲$ اندازه‌گیری شود، پارامترهای B و A فشار آب منفذی اسکمپتون به‌ترتیب کدامند؟

۱) ۱ و ۰/۴۲
۲) ۰/۷۵ و ۰/۴۲
۳) ۱ و ۰/۵۹
۴) ۰/۷۵ و ۰/۵۹

۵۲- یک نمونه خاک رس عادی‌تحکیم‌یافته در دستگاه سه‌محوری با فشار همه‌جانبه $۳۰۰\ kN/m^۲$ تحکیم داده می‌شود و سپس در شرایط زهکشی نشده با تنش انحرافی مساوی با فشار همه‌جانبه گسیخته می‌شود. در این آزمایش برای اشباع کردن رس، از پس‌فشاری معادل $۵۰\ kN/m^۲$ استفاده شده است. اگر پارامتر فشار آب حفره‌ای A اسکمپتون در لحظه گسیختگی برابر ۰/۵ باشد، زاویه اصطکاک داخلی مؤثر این خاک کدام است؟

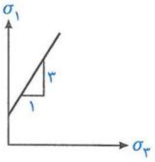
۱) ۳۰°
۲) ۳۷°
۳) ۴۵°
۴) ۵۳°

۵۳- در یک آزمایش سه‌محوری CU با فشار همه‌جانبه $۱۰۰\ kN/m^۲$، نمونه در امتداد ۶۰° نسبت به افق گسیخته می‌شود. اگر نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش طولی برای این نمونه به‌صورت زیر باشد، در آن‌صورت با فرض $A_f = ۰/۲۵$، چسبندگی زهکشی نشدهٔ خاک در این آزمایش را به‌دست آورید. (برحسب $kN/m^۲$)



۱) $۱۰۰\sqrt{۳}$
۲) $۱۰۰\frac{\sqrt{۳}}{۳}$
۳) $۲۰۰\frac{\sqrt{۳}}{۳}$
۴) صفر

۵۴-برروی یک نمونه خاک رسی آزمایش سه‌محوری CU انجام شده و پوش‌گسیختگی آن برحسب تنش‌های اصلی به‌صورت زیر ترسیم شده است. اگر در یکی از این آزمایش‌ها تنش عمود بر صفحه گسیختگی و تنش برشی در صفحه گسیختگی به‌ترتیب $۱۰۰kPa$ و $۴۰\sqrt{۳}\ kPa$ باشند، مقدار تنش همه‌جانبهٔ وارد بر نمونه در این آزمایش چقدر بوده است؟



۱) $۲۲۰\ kPa$
۲) $۲۰\sqrt{۳}\ kPa$
۳) $۶۰\ kPa$
۴) $۱۱۰\ kPa$

۵۵- در دستگاه آزمایش سه محوری بر روی یک نمونه خاک چگونه بارگذاری نماییم تا مسیر تنش در سیستم محورهای مختصات تنش‌ها (τ, σ) خطی به موازات محور قائم (τ) شود؟ (سراسری - ۸۹)

۱) تنش $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ تغییراتی مساوی و موافق هم داشته باشند.
۲) تنش $\sigma_۳$ ثابت بماند و تنش $\sigma_۱$ اضافه شود.
۳) تنش $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ تغییراتی مساوی و مخالف هم داشته باشند.
۴) تنش $\sigma_۱$ ثابت بماند و تنش $\sigma_۳$ اضافه شود.

پاسخ تست‌های فصل هشتم

۱- (۴)

مقاومت برشی خاک در نقطهٔ A در وضعیت موجود (یعنی قبل از صعود موئینگی) و پس از آن، طبق رابطهٔ $\tau_f = \sigma' \tan \phi' + c'$ به‌دست می‌آید که در آن، c' و ϕ' جزو خصوصیات خاک بوده و ثابت هستند. پس تفاوت مقاومت برشی خاک در این دو حالت به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\tau_{f_۲} - \tau_{f_۱} = (\sigma'_۲ \tan \phi' + c') - (\sigma'_۱ \tan \phi' + c') = (\sigma'_۲ - \sigma'_۱) \tan \phi' = \Delta\sigma' \tan \phi'$$

اما در رابطهٔ بالا، $\Delta\sigma'$ را می‌توان طبق مطالب خوانده شده در فصل پنجم، به‌صورت زیر تعیین کرد:

$$\begin{cases} \Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u \\ \Delta\sigma = (\gamma_{sat} - \gamma) h_c \\ \Delta u = ۰ \end{cases}$$

(با صعود مویینگی، خاک در ناحیه‌ای به ارتفاع h_c اشباع شده و با تبدیل γ به γ_{sat}، تنش کل افزایش می‌یابد.)

(با صعود مویینگی، سطح آب زیرزمینی تغییر نمی‌کند و در نتیجه فشار آب حفره‌ای نیز ثابت می‌ماند.)

$$\xrightarrow{\text{افزایش تنش مؤثر}} \Delta\sigma' = (\gamma_{sat} - \gamma) h_c = (۲۰ - ۱۸) \times ۳ = ۶ \ kN/m^۲$$

و در نهایت می‌توان میزان افزایش مقاومت برشی خاک در نقطهٔ A را به صورت زیر تعیین کرد:

$$\Delta\tau_f = \Delta\sigma' \tan \phi' = ۶ \times \tan ۳۰ = ۲\sqrt{۳} = ۳/۴ \ kN/m^۲$$

۲- (۳)

طبق مطالب خوانده شده در متن درس، تنش قائم روی صفحهٔ گسیختگی از رابطهٔ مقابل به‌دست می‌آید: $\sigma_f = \sigma_{ave} + R \cos ۲\theta$

حال برای محاسبهٔ $\sigma_{ave} = \frac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲}$ و $R = \frac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲}$، لازم است تا تنش‌های اصلی $(\sigma_۱ , \sigma_۳)$ وارد بر ایـن المـان را بیـابیم. مـی‌دانـیم $\sigma_۳$ همان تنش محفظه‌ای بوده که مقدار آن برابر $۱۰۰ \ kPa$ داده شده است و برای محاسبهٔ $\sigma_۱$ نیز می‌نویسیم:

$$\sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲ \underbrace{(۴۵ + \frac{\phi}{۲})}_{= \theta = ۶۰^\circ} + ۲ \overbrace{c}^{\text{صفر (خاک ماسه‌ای)}} \tan (۴۵ + \frac{\phi}{۲}) = ۱۰۰ \times ۳ + ۰ = ۳۰۰ \ kPa$$

$$\begin{cases} \sigma_{ave} = \frac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲} = \frac{۳۰۰ + ۱۰۰}{۲} = ۲۰۰ \ kPa \\ R = \frac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲} = \frac{۳۰۰ - ۱۰۰}{۲} = ۱۰۰ \ kPa \end{cases} \Rightarrow \sigma_f = ۲۰۰ + ۱۰۰ \times \cos (۲ \times ۶۰^\circ) = ۲۰۰ + ۱۰۰ \times (-\frac{۱}{۲}) = ۱۵۰ \ kPa$$

۳- (۳)

ابتدا با کمک رابطهٔ مور - کولمب، تنش قائم در صفحهٔ گسیختگی را محاسبه می‌کنیم.

$$\tau_f = \sigma_f \tan \phi + c \Rightarrow ۱۰۰ = \sigma_f \times \frac{\sqrt{۳}}{۳} + ۰ \Rightarrow \sigma_f = ۱۰۰\sqrt{۳} \ kN/m^۲$$

حال رابطهٔ بین σ_f و τ_f (تنش‌ها روی صفحهٔ گسیختگی) را با R و σ_{ave} در دایرهٔ مور المان در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\begin{cases} \sigma_f = \sigma_{ave} + R \cos ۲\theta \\ \tau_f = R \sin ۲ \underbrace{\theta}_{۴۵ + \frac{\phi}{۲} = ۴۵ + \frac{۳۰}{۲} = ۶۰^\circ} \Rightarrow ۱۰۰ = R \times \frac{\sqrt{۳}}{۲} \Rightarrow R = \frac{۲۰۰\sqrt{۳}}{۳} \ kN/m^۲ \end{cases}$$

$$\Rightarrow ۱۰۰\sqrt{۳} = \sigma_{ave} + \frac{۲۰۰\sqrt{۳}}{۳} \times \underbrace{\cos ۱۲۰}_{= -\frac{۱}{۲}} \Rightarrow \sigma_{ave} = \frac{۴۰۰\sqrt{۳}}{۳} \ kN/m^۲$$

و در نهایت مقادیر تنش‌های اصلی $(\sigma_۱ , \sigma_۳)$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\begin{cases} R = \frac{\sigma_۱ - \sigma_۳}{۲} \Rightarrow \sigma_۱ - \sigma_۳ = ۲R = \frac{۴۰۰\sqrt{۳}}{۳} \\ \sigma_{ave} = \frac{\sigma_۱ + \sigma_۳}{۲} \Rightarrow \sigma_۱ + \sigma_۳ = ۲\sigma_{ave} = \frac{۸۰۰\sqrt{۳}}{۳} \end{cases} \Rightarrow \sigma_۱ = \frac{۶۰۰\sqrt{۳}}{۳} \ kN/m^۲ \ , \ \sigma_۳ = \frac{۲۰۰\sqrt{۳}}{۳} \ kN/m^۲$$

توجه: شما می‌توانستید بعد از محاسبهٔ σ_{ave} و R، با امتحان گزینه‌ها (بدون تعیین $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$) نیز جواب درست را پیدا کنید.

۴- (۴)

طبق اطلاعات صورت سؤال، زاویه صفحهٔ شکست با امتداد افق برابر 30° است که با توجه به مطالب گفته شده در متن درس (صفحهٔ ۳۸۰)، یکی از دو حالت زیر مدنظر است:

الف) $\sigma_1 > \sigma_3 \Rightarrow \theta = 30^\circ \Rightarrow 45 + \frac{\phi}{2} = 30^\circ \Rightarrow \phi = -30^\circ$

ب) $\sigma_3 > \sigma_1 \Rightarrow \theta = 90 - 30 = 60^\circ \Rightarrow 45 + \frac{\phi}{2} = 60^\circ \Rightarrow \phi = 30^\circ$

از طرف دیگر زاویهٔ اصطکاک داخلیِ منفی (ϕ منفی) برای یک خاک بی‌معنی است، بنابراین حالت (الف) غیرقابل قبول بوده و مسئله بایستی براساس حالت (ب) حل شود. در این شرایط رابطهٔ تنش‌های قائم و برشی در صفحهٔ گسیختگی را با R و σ_{ave} در دایرهٔ مور در نظر گرفته و خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \sigma_f = \sigma_{ave} + R\cos 2\theta \\ \tau_f = R\sin 2\theta \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 346 = \sigma_{ave} + R\cos(2\times 60^\circ) \\ \underbrace{173}_{\to 100\sqrt{3}} = R\sin(2\times 60^\circ) \Rightarrow 100\sqrt{3} = R \times \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow R = 200\, kPa \end{cases}$$

حال در ادامه می‌توان مقادیر تنش‌های اصلی را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\begin{cases} R = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \Rightarrow \sigma_3 - \sigma_1 = 2R = 2\times 200 = 400 \\ \sigma_{ave} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \Rightarrow \sigma_1 + \sigma_3 = 2\sigma_{ave} = 2\times 446 = 892 \end{cases} \Rightarrow \sigma_1 = 246\, kPa \quad , \quad \sigma_3 = 646\, kPa$$

توجه: اگر مسئله را براساس حالت (الف) و لحاظ کردن $\theta = 30^\circ$ حل کنید، در آن‌صورت مقادیر داده شده در گزینهٔ (۱) به‌دست می‌آیند (کلید سازمان سنجش هم همین است) که البته دیدیم به علت منفی شدن ϕ، غیرقابل قبول هستند و این جواب درست نیست.

۵- (۲)

ابتدا در آزمایشِ اول، با استفاده از رابطهٔ بین تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک را به‌دست می‌آوریم:

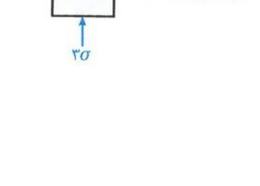
$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 2\underbrace{c}_{\text{صفر (خاک ماسه‌ای)}} \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \\ \sigma_3 = \sigma \quad , \quad \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_{d_1} = \sigma + 2\sigma = 3\sigma \end{cases}$$

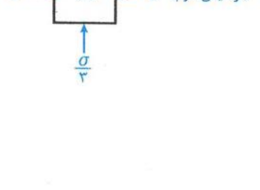
$$\Rightarrow 3\sigma = \sigma \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) + 0 \Rightarrow \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) = 3 = \tan^2 60^\circ \Rightarrow 45 + \frac{\phi}{2} = 60^\circ \Rightarrow \phi = 30^\circ$$

حال با توجه به اینکه زاویه اصطکاک داخلی خاک مقداری ثابت است، از ϕ به‌دست آمده استفاده کرده و در آزمایش دوم نیز، رابطهٔ بین تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را می‌نویسیم و در ادامه با توجه به اطلاعات صورت سؤال، $\Delta\sigma_d$ را در این آزمایش می‌یابیم:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{حداکثر}} = \sigma_{\text{حداقل}} \underbrace{\tan^2(45 + \frac{\phi}{2})}_{\tan^2 60^\circ = (\sqrt{3})^2 = 3} + \underbrace{2c\tan(45 + \frac{\phi}{2})}_{0} \\ \sigma_{\text{حداکثر}} = \sigma_3 = \sigma \quad , \quad \sigma_{\text{حداقل}} = \sigma_1 = \sigma - \underbrace{\Delta\sigma_{d_2}}_{\text{کاهش تنش قائم}} \end{cases} \Rightarrow \sigma = (\sigma - \Delta\sigma_{d_2}) \times 3 + 0 \Rightarrow \Delta\sigma_{d_2} = \frac{2}{3}\sigma$$

توجه: براساس نتایج به‌دست آمده از این تست می‌توان گفت که در لحظهٔ گسیختگی المان تنش‌های این خاک در آزمایش‌های اول و دوم، به‌صورت شکل‌های زیر است:





۶- (۳)

رابطهٔ تنش برشی در صفحهٔ گسیختگی (τ_f) با تنش‌های اصلی المان خاک (σ_1, σ_3) را به‌صورت زیر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\begin{cases} \tau_f = R \sin 2\theta = (\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}) \sin 2\theta \\ \theta = 45 + \frac{\phi}{2} = 45 + \frac{30}{2} = 60^\circ \end{cases}$$

$$\Rightarrow 10\sqrt{3} = (\frac{80 - \sigma_3}{2}) \times \underbrace{\sin(2 \times 60^\circ)}_{\frac{\sqrt{3}}{2}} \Rightarrow \sigma_3 = 40\ kPa$$

۷- (۱)

ابتدا تنش اصلی حداکثر یا همان σ_1 را برای این المان محاسبه می‌کنیم:

$$\sigma_1 = \underbrace{\sigma_3}_{\sigma_{cell} = 200\ kPa} \tan^2(\underbrace{45 + \frac{\phi}{2}}_{= \theta = 60^\circ}) + 2\underbrace{c}_{\text{صفر (خاک ماسه‌ای)}} \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \Rightarrow \sigma_1 = 200 \times \tan^2 60^\circ = 200 \times (\sqrt{3})^2 = 600\ kPa$$

سپس تنش‌های قائم و برشی روی صفحهٔ گسیختگی این المان را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\begin{cases} \sigma_f = \sigma_{ave} + R \cos 2\theta \\ \tau_f = R \sin 2\theta \\ \sigma_{ave} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{600 + 200}{2} = 400\ kPa \quad , \quad R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{600 - 200}{2} = 200\ kPa \end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma_f = 400 + 200 \times \underbrace{\cos(2 \times 60^\circ)}_{\cos 120^\circ = -\frac{1}{2}} = 400 + 200(-\frac{1}{2}) = 300\ kPa \quad , \quad \tau_f = 200 \times \underbrace{\sin(2 \times 60^\circ)}_{\sin 120^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}} = 200 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 100\sqrt{3}\ kPa$$

توجه: این تست را خیلی ساده‌تر هم می‌توان پاسخ داد، به این ترتیب که:

$$\theta = 45 + \frac{\phi}{2} = 60^\circ \Rightarrow \phi = 30^\circ \quad , \quad c = 0 \text{ (ماسه)}$$

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c \Rightarrow \tau_f = \sigma_f \times \tan 30 + 0 \Rightarrow \tau_f = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_f \Rightarrow$$ فقط گزینه (۱) در این رابطه صدق می‌کند

۸- (۲)

رابطهٔ تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر نوشته، σ'_3 (تنش جانبی) را محاسبه می‌کنیم:

$$\underbrace{\sigma'_1}_{\text{مقاومت محوری} = 420\ kN/m^2} = \sigma'_3 \tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2c' \tan(45 + \frac{\phi'}{2}) \Rightarrow 420 = \sigma'_3 \times \underbrace{\tan^2(45 + \frac{30}{2})}_{\tan^2 60^\circ = 3} + 2 \times 20\sqrt{3} \times \underbrace{\tan(45 + \frac{30}{2})}_{\tan 60^\circ = \sqrt{3}}$$

$$\Rightarrow 420 = 3\sigma'_3 + 2 \times 20\sqrt{3} \times \sqrt{3} = 3\sigma'_3 + 120 \Rightarrow \sigma'_3 = 100\ kPa$$

۹- (۱)

رابطهٔ تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\underbrace{\sigma'_1}_{\sigma_{max} = 121\ kN/m^2} = \underbrace{\sigma'_3}_{\sigma_{min} \text{ (تنش جانبی کاهش می‌یابد)}} \tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) + 2c' \tan(45 + \frac{\phi'}{2}) \Rightarrow 121 = \sigma'_3 \times \tan^2 60^\circ + 2 \times 20\sqrt{3} \times \tan 60^\circ = 3\sigma'_3 + 2 \times 20\sqrt{3} \times \sqrt{3}$$

$$\Rightarrow 121 = 3\sigma'_3 + 120 \Rightarrow \sigma'_3 = \frac{1}{3}\ kN/m^2 \simeq 0/3\ kN/m^2$$

یعنی هنگامی‌که تنش افقی (σ'_3) در نمونه به $0/3\ kN/m^2$ می‌رسد، خاک گسیخته خواهد شد.

۱۰- (۱)

ابتدا تنش‌های قائم و برشی را در این دو آزمایش به‌دست می‌آوریم.

آزمایش (۱): $\begin{cases}\sigma_1 = \dfrac{F_v}{A} = \dfrac{۸}{۵\times۵} = ۰/۳۲\ kg/cm^۲\\ \tau_1 = \dfrac{F_h}{A} = \dfrac{۶}{۵\times۵} = ۰/۲۴\ kg/cm^۲\end{cases}$ ، آزمایش (۲): $\begin{cases}\sigma_۲ = \dfrac{F_v}{A} = \dfrac{۱۲}{۵\times۵} = ۰/۴۸\ kg/cm^۲\\ \tau_۲ = \dfrac{F_h}{A} = \dfrac{۹}{۵\times۵} = ۰/۳۶\ kg/cm^۲\end{cases}$

حال این مقادیر را در رابطهٔ گسیختگی مور - کولمب جایگذاری کرده و از آنجا c و ϕ خاک را محاسبه می‌کنیم:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c \Rightarrow \begin{cases} ۰/۲۴ = ۰/۳۲\tan\phi + c & (۱)\\ ۰/۳۶ = ۰/۴۸\tan\phi + c & (۲)\end{cases}$$

رابطه (۲) − رابطه (۱) $\Rightarrow ۰/۱۲ = ۰/۱۶\tan\phi \Rightarrow \tan\phi = \dfrac{۳}{۴} = \tan ۳۷^\circ \Rightarrow \phi = ۳۷^\circ$

جایگذاری مقدار به‌دست آمده برای ϕ در رابطهٔ (۱): $۰/۲۴ = c + ۰/۳۲\times\dfrac{۳}{۴} = c + ۰/۲۴ \Rightarrow c = ۰$

۱۱- (۱)

با توجه به مقاومت برشی خاک ($\tau_f = ۱/۲\ kg/cm^۲$)، نیروی برشی به‌سادگی به‌دست می‌آید:

$$\tau_f = \frac{T}{A} \Rightarrow T = \tau_f \underbrace{A}_{\frac{\pi d^۲}{۴}} = ۱/۲\times\left(\frac{\pi\times \overbrace{۶}^{d=۶۰\ mm=۶\ cm}{}^۲}{۴}\right) = ۱۰/۸\pi \underset{\pi=۳}{=} ۳۲/۴\ kg$$

۱۲- (۱)

در آزمایش برش مستقیم، گسیختگی نمونه قطعاً در صفحه‌ای افقی اتفاق می‌افتد، زیرا دستگاه این آزمایش طوری تنظیم شده است که لغزش جعبه‌ها روی هم افقی بوده و برش خاک به‌صورت مستقیم (مورب نه) باشد، پس در این شرایط زاویهٔ صفحهٔ گسیختگی نسبت به افق برابر صفر می‌باشد. از طرفی تنش قائم در صفحهٔ گسیختگی نیز برابر است با:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{۳۶}{\left(\frac{\pi\times۶^۲}{۴}\right)} = \frac{۴}{\pi} \underset{\pi=۳}{=} ۱/۳۳\ kg/cm^۲$$

۱۳- (۲)

ابتدا با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم، ϕ و c خاک را به‌دست می‌آوریم:

$$\tau = \sigma\tan\phi + c \Rightarrow \begin{cases} \text{آزمایش اول}: ۲ = ۳\tan\phi + c & (۱)\\ \text{آزمایش دوم}: ۲/۶ = ۴\tan\phi + c & (۲)\end{cases}$$

رابطه (۲) − رابطه (۱) $\Rightarrow ۰/۶ = \tan\phi \xrightarrow{\text{جایگذاری در رابطهٔ (۱)}} ۲ = ۳\times۰/۶ + c \Rightarrow c = ۰/۲\ kg/cm^۲$

در ادامه طبق تعریف ضریب اطمینان در مقابل گسیختگی برشی، می‌نویسیم: $FS = \dfrac{\tau_f}{\tau} = \dfrac{\sigma\tan\phi + c}{\tau}$

همانطور که ملاحظه می‌کنید برای محاسبهٔ ضریب اطمینان، باید مقادیر τ و σ در صفحهٔ موردنظر (تنش‌های برشی و قائم در صفحه‌ای با زاویهٔ $\alpha = ۴۵^\circ$ از المان موردنظر) را بیابیم. بدین منظور مشابه با تست‌های قبل از روابط زیر استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\begin{cases}\sigma = \sigma_{ave} + R\cos ۲\alpha\\ \tau = R\sin ۲\alpha\\ \sigma_{ave} = \dfrac{\sigma_۱+\sigma_۳}{۲} = \dfrac{۷+۳}{۲} = ۵\ kg/cm^۲ \ ,\ R = \dfrac{\sigma_۱-\sigma_۳}{۲} = \dfrac{۷-۳}{۲} = ۲\ kg/cm^۲\ ,\ \alpha = ۴۵^\circ\end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma = ۵ + ۲\times\underbrace{\cos(۲\times۴۵^\circ)}_{\cos ۹۰^\circ = ۰} = ۵\ kg/cm^۲\ ,\ \tau = ۲\times\underbrace{\sin(۲\times۴۵^\circ)}_{\sin ۹۰^\circ = ۱} = ۲\ kg/cm^۲$$

در نهایت ضریب اطمینان خواسته شده برابر می‌شود با: $FS = \dfrac{\tau_f}{\tau} = \dfrac{\sigma\tan\phi + c}{\tau} = \dfrac{۵\times۰/۶ + ۰/۲}{۲} = ۱/۶$

(۳) -۱۴

در ابتدای مرحله دوم آزمایش سه محوری (آزمایش برشی)، $\sigma_۳ = \sigma_۱$ بوده و $\frac{\sigma_۳}{\sigma_۱} = ۱$ می‌شود. همچنین در هنگام گسیختگی نمونه خواهیم داشت:

$$\sigma_۱ = \sigma_۳ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) + ۲\underbrace{c}_{\text{صفر (رس عادی تحکیم یافته)}} \tan(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) = \sigma_۳ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲}) \Rightarrow \frac{\sigma_۳}{\sigma_۱} = \frac{۱}{\tan^۲(۴۵ + \frac{\phi}{۲})} = \tan^۲(۴۵ - \frac{\phi}{۲})$$

(۳) -۱۵

همانطورکه در «بررسی یک موضوع مهم» پس از تمرین (۱۶) گفته شد، در آزمایش سه محوری CD بر روی خاک‌های دانه‌ای متشکل از مخلوط شن و قلوه سنگ، با افزایش $\sigma_۳$ گوشه‌های تیز دانه‌های خاک به تدریج ساییده شده و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد.

(۳) -۱۶

رابطهٔ بین تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\underbrace{\sigma'_۱}_{\sigma'_۳ + \Delta\sigma_d} = \sigma'_۳ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) + ۲c' \tan(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow ۱ + \Delta\sigma_d = ۱ \times \underbrace{\tan^۲(۴۵ + \frac{۳۰}{۲})}_{\tan^۲ ۶۰ = ۳} + ۲ \times ۰/۳ \times \underbrace{\tan(۴۵ + \frac{۳۰}{۲})}_{\tan^۲ ۶۰^\circ = \sqrt{۳} \simeq ۱/۷}$$

$$\Rightarrow ۱ + \Delta\sigma_d = ۱ \times ۳ + ۲ \times ۰/۳ \times ۱/۷ = ۴/۰۲ \Rightarrow \Delta\sigma_d = ۳/۰۲\ kg/cm^۲$$

همچنین زاویهٔ صفحهٔ گسیختگی نسبت به امتداد افق برابر است با:

$$\theta = ۴۵ + \frac{\phi'}{۲} = ۴۵ + \frac{۳۰}{۲} = ۶۰^\circ$$

(۱) -۱۷

در این نمونه، تنش افقی یا همان فشار محفظه‌ایِ $\sigma'_۳ = ۴/۸\ kg/cm^۲$، تنش اصلی حداکثر است و تنش قائم $\sigma'_۱$ یعنی تنش کاهش یافته در نمونه، تنش اصلی حداقل می‌باشد. حال با توجه به رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی برای این نمونه، خواهیم داشت:

$$\sigma'_{\text{حداکثر}} = \sigma'_{\text{حداقل}} \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) + ۲c' \tan(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow ۴/۸ = \sigma'_{\text{قائم}} \tan^۲(۴۵ + \frac{۳۰}{۲}) + ۲ \times \frac{\sqrt{۳}}{۲} \times \tan(۴۵ + \frac{۳۰}{۲})$$

$$\Rightarrow ۴/۸ = ۳\sigma'_{\text{قائم}} + ۲ \times \frac{\sqrt{۳}}{۲} \times \sqrt{۳} = ۳\sigma'_{\text{قائم}} + ۳ \Rightarrow \sigma'_{\text{قائم}} = ۰/۶\ kg/cm^۲$$

(۴) -۱۸

زاویهٔ اصطکاک داخلی در یک خاک رسی، از خصوصیات خاک بوده و با زیاد یا کم کردن تنش‌ها، تغییری نمی‌کند. بنابراین گزینه (۴) درست است.

(۳) -۱۹

رابطهٔ تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\underbrace{\sigma'_۱}_{\sigma'_۳ + \Delta\sigma_d} = \sigma'_۳ \tan^۲\theta + ۲\underbrace{c'}_{\text{صفر (رس } NC\text{)}} \tan\theta \Rightarrow \sigma'_۳ + \Delta\sigma_d = \sigma'_۳ \tan^۲\theta$$

$$۱۵۰ + ۳۰۰ = ۱۵۰ \tan^۲\theta \Rightarrow \tan^۲\theta = ۳ = \tan^۲ ۶۰^\circ \Rightarrow \theta = ۶۰^\circ$$ (زاویهٔ صفحهٔ گسیختگی نسبت به افق)

همچنین طبق محاسبات فوق و مشابه نتیجهٔ به‌دست آمده از تمرین (۱۹) در متن درس، می‌توان گفت:

$$\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_۳} = \underbrace{\tan^۲\theta - ۱}_{\text{مقدار ثابت}} \Rightarrow \frac{(\Delta\sigma_d)_۱}{(\sigma'_۳)_۱} = \frac{(\Delta\sigma_d)_۲}{(\sigma'_۳)_۲} \Rightarrow \frac{۳۰۰}{۱۵۰} = \frac{(\Delta\sigma_d)_۲}{۲۵۰} \Rightarrow (\Delta\sigma_d)_۲ = ۵۰۰\ kN/m^۲$$

(۱) -۲۰

ابتدا رابطهٔ تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را در نظر گرفته و ϕ خاک را می‌یابیم:

$$\underbrace{\sigma'_۱}_{\sigma'_۳ + \Delta\sigma_d} = \sigma'_۳ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) + ۲\underbrace{c'}_{\text{صفر (خاک ماسه‌ای)}} \tan(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow (۱۲۰ + ۶۰) = ۶۰ \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow \tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) = ۳ = \tan^۲ ۶۰^\circ$$

$$\Rightarrow ۴۵ + \frac{\phi'}{۲} = ۶۰^\circ \Rightarrow \phi' = ۳۰^\circ$$

حال با استفاده رابطهٔ گسیختگی مور - کولمب (که در آزمایش برش مستقیم کاربرد دارد) خواهیم داشت:

$$\tau_f = \sigma_f \tan\phi + c = ۵۰ \times \tan ۳۰^\circ + ۰ = ۵۰ \times \frac{\sqrt{۳}}{۳} \Rightarrow \tau_f \simeq ۲۸/۹\ kN/m^۲$$

۲۱- (۲)

مشابه تست شمارهٔ (۱۹) و با توجه به نتیجهٔ به‌دست آمده از تمرین (۱۹) در متن درس، چون خاک مورد آزمایش ماسه‌ای ($c=0$) است، می‌توان نوشت:

$$(\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma_3}) = tan^2\theta - 1 = tan^2(45+\frac{\phi}{2}) - 1 = \text{مقداری ثابت}$$

$$\Rightarrow \frac{(\Delta\sigma_d)_1}{(\sigma_3)_1} = \frac{(\Delta\sigma_d)_2}{(\sigma_3)_2} \Rightarrow (\Delta\sigma_d)_2 = 2(\Delta\sigma_d)_1$$

تنش همه جانبه را دو برابر کرده‌ایم: $(\sigma_3)_2 = 2(\sigma_3)_1$

یعنی تنش انحرافی نیز ۲ برابر آزمایش اول خواهد شد.

۲۲- (۴)

رابطهٔ بین تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را براساس حاکمیت تنش‌های مؤثر به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$\sigma_1' = \sigma_3' tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c' tan(45+\frac{\phi'}{2}) \Rightarrow (\sigma_1 - u_f) = (\sigma_3 - u_f) tan^2(45+\frac{30}{2})$$

$c'=0$ ، $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d = \sigma_3 + \sigma_3 = 2\sigma_3$

$$\Rightarrow (2\times120 - u_f) = (120 - u_f)\times 3 \Rightarrow 2u_f = 120 \Rightarrow u_f = 60\ kN/m^2$$

۲۳- (۳)

رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی وارد بر المان را براساس حاکمیت تنش مؤثر به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$\sigma_1' = \sigma_3' tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c' tan(45+\frac{\phi'}{2}) \Rightarrow (125-32) = (\sigma_3 - 32)\times tan^2(45+\frac{30}{2}) + 2\times8\times tan(45+\frac{30}{2})$$

$\sigma_1' \to \sigma_1 - u_f$ ، $\sigma_3' \to \sigma_3 - u_f$ ، $tan(45+\frac{30}{2}) = \sqrt{3} = 1/7$

$$\Rightarrow 93 = 3\times(\sigma_3 - 32) + 2\times8\times1/7 \simeq 3\sigma_3 - 69 \Rightarrow 3\sigma_3 = 162 \Rightarrow \sigma_3 = 54\ kPa$$

۲۴- (۴)

رابطهٔ بین تنش‌های اصلی در لحظهٔ گسیختگی را در حالت حاکمیت تنش مؤثر به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$\sigma_1' = \sigma_3' tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c' tan(45+\frac{\phi'}{2}) \Rightarrow (100+100-u_f) = (100-u_f)\times tan^2(45+\frac{30}{2}) + 0$$

$\sigma_1' \to \sigma_3 + \Delta\sigma_d - u_f$ ، $\sigma_3' \to \sigma_3 - u_f$ ، $c' \to$ صفر (خاک ماسه‌ای)

$$\Rightarrow (200-u_f) = (100-u_f)\times 3 \Rightarrow u_f = 50\ kPa$$

۲۵- (۲)

اگر اختلاف تنش‌های اصلی σ_1' و σ_3' در لحظهٔ گسیختگی برابر $\Delta\sigma_d$ شده باشد، در آن صورت چون آهنگ تغییرات این تنش‌ها (افزایش σ_1' و کاهش σ_3') یکسان است، بنابراین تنش‌های σ_1' و σ_3' در لحظهٔ گسیختگی برابر می‌شوند با:

$$\sigma_1' = 300 + \frac{\Delta\sigma_d}{2} \quad , \quad \sigma_3' = 300 - \frac{\Delta\sigma_d}{2}$$

حال با جایگذاری σ_1' و σ_3' در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی، ابتدا مقدار $\Delta\sigma_d$ را یافته و سپس σ_1' و σ_3' را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$\sigma_1' = \sigma_3' tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2c' tan(45+\frac{\phi'}{2}) \Rightarrow (300+\frac{\Delta\sigma_d}{2}) = (300-\frac{\Delta\sigma_d}{2})\times tan^2(45+\frac{30}{2}) + 2\times25\sqrt{3}\times tan(45+\frac{30}{2})$$

$$\Rightarrow (300+\frac{\Delta\sigma_d}{2}) = (300-\frac{\Delta\sigma_d}{2})\times3 + 2\times25\sqrt{3}\times\sqrt{3} = 900 - \frac{3}{2}\Delta\sigma_d + 150 \Rightarrow 2\Delta\sigma_d = 750 \Rightarrow \Delta\sigma_d = 375\ kPa$$

$$\sigma_1' = 300 + \frac{\Delta\sigma_d'}{2} = 300 + \frac{375}{2} = 487/5\ kPa$$

$$\sigma_3' = 300 - \frac{\Delta\sigma_d}{2} = 300 - \frac{375}{2} = 112/5\ kPa$$

۲۶- (۴)

همانطورکه در متن درس توضیح داده شد، صفر بودن زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک رس در شرایط آزمایش UU، به علت اشباع بودن نمونـه و عـدم تحکیم آن است. حال آنکه اگر نمونه اشباع نباشد و در آن تحکیم رخ دهد، در آن‌صورت شاهد ظاهر شدن اصطکاک در خاک خواهیم بود.

۲۷- (۲)

در متن درس دیدیم که در آزمایش UU بر روی یک نمونه خاک رس اشباع:

الف) $\Delta\sigma_d$ برای نمونه‌های مختلفی که تحت آزمایش قرار می‌گیرند مقدار ثابتی است، بنابراین در این سؤال می‌توان نوشت:

آزمایش اول: $\Delta\sigma_d = \sigma_۱ - \sigma_۳ = ۰/۳۵ - ۰/۱ = ۰/۲۵\ MPa$

آزمایش دوم: $\Delta\sigma_d = \sigma_۱ - \sigma_۳ \Rightarrow ۰/۲۵ = ۰/۵ - \sigma_۳ \Rightarrow \sigma_۳ = ۰/۲۵\ MPa$

ب) زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک $\phi_u = ۰$ بوده و در نتیجه زاویهٔ صفحهٔ شکست با امتداد افق (θ) برابر می‌شود با:

$$\theta = ۴۵ + \frac{\phi_u}{۲} = ۴۵ + ۰ = ۴۵^\circ$$

۲۸- (۲)

در آزمایش UU نمونه تغییر حجم نمی‌دهد، بنابراین می‌توان نوشت:

$$\underbrace{V_۰}_{\text{حجم اولیه نمونه}} = \underbrace{V}_{\text{حجم نمونه در لحظهٔ گسیختگی}} \Rightarrow A_۰ H_۰ = AH \Rightarrow A = A_۰\left(\frac{H_۰}{H}\right) = \frac{\pi \times ۱۰^۲}{۴} \times \frac{۱۶}{۱۵} = ۸۰\ cm^۲$$

پس $\Delta\sigma_d$ در لحظهٔ گسیختگی برابر می‌شود با:

$$\Delta\sigma_d = \frac{F_d}{A} = \frac{۴۸}{۸۰} = ۰/۶\ kg/cm^۲$$

و در نهایت مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ این نمونه برابر است با:

$$c_u = \frac{۱}{۲}\Delta\sigma_d = \frac{۱}{۲} \times ۰/۶ = ۰/۳\ kg/cm^۲$$

۲۹- (۲)

برای خاک رس عادی تحکیم یافته، طبق رابطهٔ اسکمپتون داریم:

$$\begin{cases} \left(\frac{c_u}{\sigma'_z}\right)_{NC} = ۰/۱۱ + ۰/۰۰۳۷\, PI \\ \sigma'_{z(\text{در وسط لایهٔ رسی})} = \sum_{i=۱}^{n} (\gamma' z)_i = ۱۶ \times ۵ + (۲۰ - ۱۰) \times \frac{۴}{۲} = ۱۰۰\ kPa \quad , \quad PI = ۴۰ \end{cases}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{c_u}{۱۰۰}\right)_{NC} = ۰/۱۱ + ۰/۰۰۳۷ \times ۴۰ = ۰/۲۵۸ \Rightarrow c_u = ۱۰۰ \times ۰/۲۵۸ = ۲۵/۸\ kN/m^۲$$

۳۰- (۲)

رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را با حاکمیت تنش‌های مؤثر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\underbrace{\sigma'_۱}_{\sigma_۳ + \Delta\sigma_d - u_f} = \underbrace{\sigma'_۳}_{\sigma_۳ - u_f} \tan^۲\left(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}\right) + ۲ \underbrace{c'}_{\text{صفر (رس NC)}} \tan\left(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}\right) \xrightarrow[\Delta\sigma_d = q_u\ ,\ \sigma_۳ = ۰]{\text{آزمایش تک محوری}} (۶۰ - u_f) = (۰ - u_f) \times \tan^۲\left(۴۵ + \frac{۳۰}{۲}\right) + ۰$$

$$\Rightarrow ۶۰ - u_f = -u_f \times ۳ \Rightarrow u_f = -۳۰\ kPa$$

۳۱- (۳)

رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را به‌صورت زیر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\underbrace{\sigma_۱}_{\sigma_۳ + \Delta\sigma_d} = \underbrace{\sigma_۳}_{\text{صفر (آزمایش تک محوری)}} \tan^۲\left(۴۵ + \frac{\phi}{۲}\right) + ۲c \tan\left(۴۵ + \frac{\phi}{۲}\right) \Rightarrow ۰ + \Delta\sigma_d = ۰ + ۲ \times ۳۰ \times \underbrace{\tan\left(۴۵ + \frac{۲۰}{۲}\right)}_{\tan ۵۵ = ۱/۴} \Rightarrow \Delta\sigma_d = ۲ \times ۳۰ \times ۱/۴ = ۸۴\ kPa$$

می‌دانیم $\Delta\sigma_d$ در آزمایش تک محوری، همان q_u می‌باشد، بنابراین می‌توان مقاومت برشی زهکشی نشده (c_u) این خاک را بـه‌صـورت زیـر محاسبه نمود:

$$c_u = \frac{۱}{۲} q_u = \frac{۱}{۲}\Delta\sigma_d = \frac{۱}{۲} \times ۸۴ = ۴۲\ kN/m^۲$$

۳۲- (۲)

ابتدا با توجه به نتایج آزمایش تک محوری، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$q_u = ۲c\, tan\,(۴۵+\frac{\phi}{۲}) \Rightarrow ۲\sqrt{۳} = ۲\times ۱\times tan\,(۴۵+\frac{\phi}{۲}) \Rightarrow tan\,(۴۵+\frac{\phi}{۲}) = \sqrt{۳} = tan\, ۶۰^\circ \Rightarrow ۴۵+\frac{\phi}{۲} = ۶۰ \Rightarrow \phi = ۳۰^\circ$$

حال رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را برای آزمایش سه محوری بر روی این خاک می‌نویسیم تا مقدار $\Delta\sigma_d$ به‌دست آید:

$$\underbrace{\sigma_۱}_{\sigma_۳+\Delta\sigma_d} = \sigma_۳\, tan^۲(۴۵+\frac{\phi}{۲}) + ۲c\, tan\,(۴۵+\frac{\phi}{۲})$$

$$(۱+\Delta\sigma_d) = ۱\times tan^۲(۴۵+\frac{۳۰}{۲}) + ۲\times ۱\times tan\,(۴۵+\frac{۳۰}{۲}) = ۱\times ۳ + ۲\times ۱\times\sqrt{۳} = ۳+۲\sqrt{۳} \Rightarrow \Delta\sigma_d = ۲+۲\sqrt{۳} = ۲(۱+\sqrt{۳})\ kg/cm^۲$$

توجه: در این آزمایش تک محوری $q_u = ۲\sqrt{۳}\ kg/cm^۲ \neq ۲c$ است، بنابراین نمونهٔ مذکور اشباع نمی‌باشد.

۳۳- (۱)

هرگاه بررسی لغزش جسمی بر روی خاک مورد نظر باشد، لازم است بسته به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، دو سطح لغزش زیر را مدنظر قرار دهیم:

۱- لغزش در سطح تماس جسم و خاک زیر آن (لغزش جسم بر روی خاک)

۲- لغزش در بالاترین لایهٔ خاک (لغزش خاک بر روی خاک)

هر کدام از این سطوح لغزش که مقاومت برشی کمتری داشته باشد، بحرانی‌تر خواهد بود. در این سؤال چون لغزش سد بتنی روی خاک مدنظر است، بنابراین باید مقاومت برشی دو سطح لغزش زیر را محاسبه کرده و کمترین یا همان بحرانی‌ترین سطح را مشخص کنیم.

۱) لغزش سد بتنی بر روی خاک:

$$c_a = ۰\ ,\ \delta = ۴۲^\circ \Rightarrow \tau_{f_۱} = \sigma\, tan\,\delta + c_a = \sigma\, tan\, ۴۲^\circ + ۰ = ۰/۹\,\sigma$$

۲) لغزش خاک بر روی خاک:

با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم، پارامترهای مقاومت برشی خاک را به‌دست می‌آوریم. توجه کنید که در این سؤال چون بارگذاری لرزه‌ای مدنظر است، بنابراین بایستی از نتایج آزمایش در حالت حاکمیت تنش کل (شرایط زهکشی نشده) استفاده گردد.

$$\tau = \sigma\, tan\,\phi + c \Rightarrow \begin{cases} \text{آزمایش (۱)}: ۳/۴ = ۴\, tan\,\phi + c \\ \text{آزمایش (۲)}: ۵/۱ = ۶\, tan\,\phi + c \end{cases} \Rightarrow tan\,\phi = ۰/۸۵\ ,\ c = ۰$$

$$\Rightarrow \tau_{f_۲} = \sigma\, tan\,\phi + c = \sigma\times ۰/۸۵ + ۰ = ۰/۸۵\,\sigma$$

از مقایسهٔ $\tau_{f_۱}$ و $\tau_{f_۲}$ می‌توان دید که سطح لغزش دوم (داخل خاک) مقاومت برشی کمتری داشته و بحرانی‌تر است. بنابراین همین سطح لغزش را مدنظر قرار داده و می‌نویسیم: $\tau_f = \tau_{f_۲} = ۰/۸۵\,\sigma$

حال در ادامه، طبق تعریف ضریب اطمینان در مقابل لغزش، خواهیم داشت:

$$FS = \frac{\tau_{\text{مقاوم}}}{\tau_{\text{مخرب}}} = \frac{\tau_f}{\tau}$$

$$\begin{cases} \tau_f = ۰/۸۵\,\sigma \\ \sigma = \dfrac{W}{A} = \dfrac{۱۰۰۰۰}{A} \end{cases} \Rightarrow \tau_f = ۰/۸۵\times\frac{۱۰۰۰۰}{A} = \frac{۸۵۰۰}{A}$$

$$\begin{cases} \tau_{\text{مخرب}} = \dfrac{T}{A} \\ T = \underbrace{F_H}_{\text{نیروی ناشی از فشار آب}} + \dfrac{a}{g}W = \dfrac{۱}{۲}\underbrace{\gamma_w}_{۱t/m^۳} H^۲ + \dfrac{۰/۳g}{g}\times ۱۰۰۰۰ = \dfrac{۱}{۲}\times ۱\times H^۲ + ۳۰۰۰ = \dfrac{H^۲}{۲} + ۳۰۰۰ \end{cases} \Rightarrow \tau = \frac{\dfrac{H^۲}{۲}+۳۰۰۰}{A}$$

و در نهایت به ازاء $FS = ۲$ (طبق صورت سؤال) مقدار H را به صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$۲ = \frac{(\dfrac{۸۵۰۰}{A})}{(\dfrac{\frac{H^۲}{۲}+۳۰۰۰}{A})} \Rightarrow H^۲ + ۶۰۰۰ = ۸۵۰۰ \Rightarrow H = ۵۰\, m$$

(۴) -۳۴

در آزمایش سه محوری CU، فارغ از نوع خاک همیشه در ابتدای مرحلهٔ دوم با افزایش فشار آب حفره‌ای مواجه می‌شویم، بنابراین گزینه‌های (۱) و (۳) نادرست هستند. حال اگر خاک رس عادی تحکیم یافته باشد، این روند افزایش فشار آب حفره‌ای تا لحظهٔ گسیختگی هم ادامه دارد ولی در خاک رس پیش تحکیم یافته، نمونه تغییر رفتار داده و در ادامه تا لحظهٔ گسیختگی، کاهش فشار آب حفره‌ای خواهد داشت.

با توجه به توضیحات فوق، گزینهٔ (۴) پاسخ صحیح این تست است.

(۳) -۳۵

رابطهٔ تجربی اسکمپتون را در نظر بگیرید:

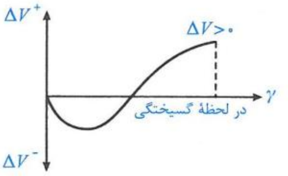
$$\left(\frac{c_u}{\sigma'_z}\right)_{NC} = ۰/۱۱ + ۰/۰۰۳۷\,PI$$

واضح است که با افزایش سربار مؤثر (σ'_z)، مقاومت برشی زهکشی نشده خاک (c_u) افزایش می‌یابد و در نتیجه عبارت گزینهٔ (۳) نادرست بوده و پاسخ این تست است.

توجه: علت صحیح بودن سایر گزینه‌ها را می‌توانید در تعریف و توضیحات داده شده در مورد مفهوم حساسیت خاک رس در متن درس مشاهده نمایید.

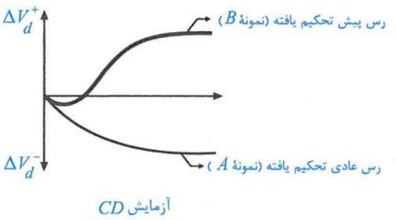
(۴) -۳۶

با توجه به نمودار تغییر حجم ماسهٔ متراکم در آزمایش برش مستقیم، ملاحظه می‌شود که در هنگام گسیختگی حجم نمونه افزایش می‌یابد.

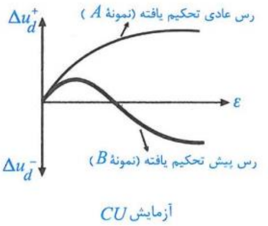


(۴) -۳۷

با توجه به صورت سؤال و گزینه‌های مطرح شده، نمودار تغییر حجم و تغییر فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها را به‌ترتیب در مرحلهٔ دوم آزمایش‌های CD و CU مدنظر قرار می‌دهیم. توجه کنید که در مرحلهٔ دوم آزمایش CU، نمونه تغییر حجم نداده (گزینهٔ ۱ غلط است) و در مرحلهٔ دوم آزمایش CD نیز، فشار آب حفره‌ای صفر است (گزینهٔ ۳ غلط است).



آزمایش CD



آزمایش CU

با توجه به نمودارهای فوق، ملاحظه می‌کنید که خاک A در آزمایش CD با کاهش حجم ($\Delta V_d < ۰$) و در آزمایش CU با افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای ($\Delta u_d > ۰$) مواجه می‌شود. این در حالی است که خاک B در آزمایش CD، افزایش حجم ($\Delta V_d > ۰$) داده و در آزمایش CU، با کاهش فشار آب حفره‌ای ($\Delta u_d < ۰$) مواجه می‌شود. پس عبارت ذکر شده در گزینهٔ (۴) صحیح بوده و گزینهٔ (۲) نادرست است.

(۳) -۳۸

توجه داشته باشید که هر سهٔ این نمودارها مربوط به آزمایش برش مستقیم هستند، چرا که محور افقی نمودارها معرف کرنش زاویه‌ای γ است. با مراجعه به نمودارهای رسم شده در مورد این آزمایش در متن درس، می‌توانید نمودارهای (الف) و (ج) را مشاهده کنید. نمودار (ب) نیز طبق توضیحات داده شده در تذکر (۴) که قبل از تمرین (۲۷) آمده است، صحیح می‌باشد.

۳۹- (۱)

ابتدا با یک نگاه کلی به جواب‌ها، متوجه می‌شویم که گزینه‌های (۳) و (۴) نادرست می‌باشند، زیرا در آزمایش CD حجم نمونه تغییر می‌کند (گزینهٔ ۳ غلط است) و در مرحلهٔ دوم آزمایش CU نیز حجم نمونه ثابت است (گزینهٔ ۴ غلط است). اما بررسی دو گزینهٔ باقی مانده:

گزینه (۱): در آزمایش CU، فشار آب حفره‌ای در نمونهٔ ماسه‌ای متراکم ابتدا افزایش و سپس تا لحظهٔ گسیختگی کاهش می‌یابد. همچنین چون σ_3 کم است، $\Delta V_c \simeq 0$ بوده و حجم نمونه در هر دو مرحله ثابت خواهد بود. پس این گزینه درست است و پاسخ تست می‌باشد.

گزینه (۲): علت نادرست بودن گزینهٔ (۲) آن است که مقاومت برشی نمونه پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود، ثابت باقی نمانده و کاهش می‌یابد.

۴۰- (۴)

از آنجاکه در مرحلهٔ دوم آزمایش‌های CD و CU به‌ترتیب فشار منفذی و تغییر حجم نمونه صفر است، بنابراین گزینه‌های (۱)، (۲) و (۳) نادرست بوده و گزینهٔ (۴) پاسخ این سؤال خواهد بود.

۴۱- (۴)

آزمایش مورد سؤال در این تست، آزمایش تحکیم یافتهٔ زهکشی نشده (CU) و خاک تحت آزمایش، رس پیش تحکیم یافته است. بنابراین در لحظهٔ گسیختگی با کاهش فشار آب حفره‌ای در نمونه مواجه می‌شویم و گزینه (۴) پاسخ درست و گزینهٔ (۳) نادرست است. علت نادرست بودن گزینهٔ (۱) آن است که در مرحلهٔ اول آزمایش CU، نمونه با کاهش حجم مواجه می‌شود و نادرست بودن گزینه (۲) نیز به این علت است که حجم نمونه در تمام مرحلهٔ دوم آزمایش از جمله در لحظهٔ گسیختگی ثابت بوده و کاهش نمی‌یابد.

۴۲- (۲)

می‌دانیم در لحظهٔ گسیختگی، نسبت تخلخل نمونه‌های شل و متراکم یکسان بوده و برابر e_{cr} می‌شود. پس می‌توان گفت:

$$e_{cr} = e_{\text{نمونهٔ شل}} = e_{\text{نمونهٔ متراکم}} = 0/5$$

حال می‌توان وزن مخصوص خشک نمونهٔ شل را در لحظهٔ گسیختگی آن به‌دست آورد:

$$\gamma_{d\,\text{نمونهٔ شل}} = \frac{G_s\,\gamma_w}{1+e_{\text{نمونهٔ شل}}} = \frac{2/5\times 1}{1+0/5} = 1/67\ t/m^3 \qquad (\gamma_w \to 1\,t/m^3)$$

۴۳- (۱)

شیب خاکی رس اشباع (که یک شیب طبیعی است)، تحت اثر وزن خود تحکیم یافته ***Consolidated*** است، ولی چون ساخت سازه و در نتیجه بارگذاری بر روی شیب خاکی سریع است، گسیختگی آن در شرایط زهکشی نشده ***Undrained*** اتفاق می‌افتد. از این‌رو نتایج آزمایش CU ملاک کار قرار می‌گیرد.

۴۴- (۴)

در بلند مدت، شیروانی خاکی تحت اثر وزن خود تحکیم یافته است و گسیختگی آن به‌صورت لغزش تدریجی و در شرایط زهکشی شده رخ می‌دهد. بنابراین بایستی از پارامترهای مؤثر مقاومت برشی استفاده کنیم که به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\phi', c' \Rightarrow \begin{cases} \text{آزمایش } CD \\ \text{آزمایش } CU \text{ در حالت حاکمیت تنش مؤثر} \end{cases}$$

۴۵- (۲)

رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را براساس حاکمیت تنش‌های مؤثر به شکل زیر می‌نویسیم و پس فشار و $\sigma_{3\,\text{اولیه}}$ را در آن حذف می‌کنیم:

$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2\,c'\,\tan(45+\frac{\phi'}{2}) \qquad (c' \to \text{صفر (رس } NC\text{)})$$

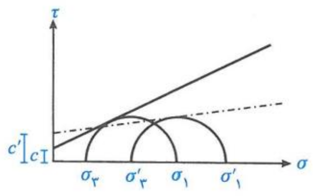
$$\sigma_3' = \sigma_3 - u_f = (300-50)-(200-50) = 100\ kPa \qquad (50 \to \sigma_{3\,\text{اولیه}},\ 50 \to u_{BP})$$

$$\sigma_1' = \sigma_1 - u_f = (\sigma_3 + \Delta\sigma_d) - u_f = (\sigma_3 - u_f) + \Delta\sigma_d = \sigma_3' + \Delta\sigma_d = 100+200 = 300\ kPa$$

حال با جایگذاری مقادیر σ_1' و σ_3' در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی خواهیم داشت:

$$300 = 100\tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 0 \Rightarrow \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) = 3 = \tan^2 60^\circ \Rightarrow 45+\frac{\phi'}{2} = 60 \Rightarrow \phi' = 30^\circ$$

۴۶- (۲)



چسبندگی زهکشی نشده (c) با حاکمیت تنش‌های کل و چسبندگی زهکشی شده (c') با حاکمیت تنش‌های مؤثر به‌دست می‌آید. حال دایرهٔ مور المان تنش‌های این دو حالت را رسم می‌کنیم. توجه کنید که چون خاک رس بسیار پیش تحکیم یافته است، فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی منفی بوده و به همین علت خواهیم داشت:

$$\sigma = \sigma' + u \xrightarrow{u<0} \sigma < \sigma'$$

با توجه به شکل ملاحظه می‌کنید که $c' > c$ است.

۴۷- (۱)

هر چه نمونه اشباع‌تر باشد، با توجه به توضیحات مربوط به پارامتر B اسکمپتون در متن درس، فشار آب حفره‌ای تا قبل از باز شدن شیرهای زهکشی در مرحلهٔ اول آزمایش سه محوری بیشتر خواهد شد. پس می‌توان گفت با افزایش درجهٔ اشباع، ضریب B افزایش خواهد یافت.

۴۸- (۲)

می‌دانیم پارامتر B اسکمپتون حداکثر برابر یک است و آن زمانی است که نمونه اشباع باشد. اینکه $B > 1$ به‌دست آمده است، نشان‌دهندهٔ یک نوع اخلال در آزمایش است که ظاهراً به علت سوراخ شدن غشاء لاستیکی رخ داده است. غشاء لاستیکی به این علت در اطراف نمونه قرار داده می‌شود که از تماس مستقیم آب اطراف نمونه با خاک آزمایش جلوگیری کند. حال اگر غشاء لاستیکی سوراخ شود، این تماس برقرار شده و فشار آب حفره‌ای نمونه کمی بیشتر از تنش همه جانبه σ_3 خواهد بود که همین امر باعث می‌شود تا پارامتر B اسکمپتون کمی از یک بیشتر شود.

۴۹- (۱)

با توجه به مقدار $\Delta\sigma_d$ (تفاوت تنش‌ها) و نیز مقدار ضریب A اسکمپتون در لحظهٔ گسیختگی، فشار آب حفره‌ای در این لحظه برابر می‌شود با:

$$A_f = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \Rightarrow 0/75 = \frac{\Delta u_d}{200} \Rightarrow \Delta u_d = u_f = 150\ kPa$$

در ادامه رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را بر اساس حاکمیت تنش‌های مؤثر نوشته و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر را به صورت زیر می‌یابیم:

$$\begin{cases} \sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 2\underbrace{c'}_{\text{صفر (رس NC)}}\tan(45+\frac{\phi'}{2}) \\ \sigma'_3 = \sigma_3 - u_f = 250 - 150 = 100\ kPa \\ \sigma'_1 = \sigma_1 - u_f = (\sigma_3 + \Delta\sigma_d) - u_f = (250+200) - 150 = 300\ kPa \end{cases}$$

$$\Rightarrow 300 = 100 \times \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) + 0 \Rightarrow \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) = 3 = \tan^2 60 \Rightarrow 45+\frac{\phi'}{2} = 60 \Rightarrow \phi' = 30^\circ$$

اما برای به‌دست آوردن مقاومت برشی در شرایط زهکشی شده می‌نویسیم:

$$\tau_f = \sigma'_f \tan\phi' + \underbrace{c'}_{0}$$

که مقدار σ'_f بر روی صفحهٔ گسیختگی برابر است با:

$$\begin{cases} \sigma'_f = \sigma'_{ave} + R\cos 2\theta \\ \sigma'_{ave} = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} = \frac{300+100}{2} = 200\ kPa \quad , \quad R = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{300-100}{2} = 100\ kPa \\ \theta = 45 + \frac{\phi'}{2} = 45 + \frac{30}{2} = 60^\circ \end{cases}$$

$$\Rightarrow \sigma'_f = 200 + 100 \times \underbrace{\cos(2\times 60^\circ)}_{\cos 120^\circ = -\frac{1}{2}} = 200 + 100 \times (-\frac{1}{2}) = 150\ kPa$$

و در نهایت τ_f در شرایط زهکشی شده برابر می‌شود با:

$$\tau_f = 150 \times \tan 30 + 0 = 150 \times \frac{\sqrt{3}}{3} = 50\sqrt{3}\ kPa$$

توجه: اگر این سؤال را حل نکردید، نا امید نشوید. سؤال سختی بود!

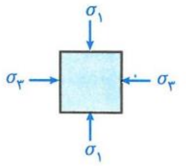
۵۰- (۱)

ابتدا رابطهٔ اسکمپتون را به‌صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

وضعیت تنش‌ها برای المان مورد نظر در داخل خاک و نیز در سطح زمین به‌صورت شکل‌های زیر می‌باشد:

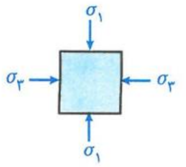
: داخل خاک



$\sigma_۱ = \gamma_{sat}\, h = ۲۰ \times ۳ = ۶۰\ kN/m^۲$

$\sigma_۳ = ۴۰\ kN/m^۲$ (طبق اطلاعات داده شده در سؤال)

: در سطح زمین



$\sigma_۱ = \sigma_۳ = ۰$

بنابراین میزان تغییرات تنش‌های کل $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ برابر می‌شود با:

$$\Delta\sigma_۱ = ۰ - ۶۰ = -۶۰\ kPa$$

$$\Delta\sigma_۳ = ۰ - ۴۰ = -۴۰\ kPa$$

و در نهایت میزان تغییر فشار آب حفره‌ای به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta u = \boxed{۱} \times [-۴۰ + ۰/۷۵ \times (-۶۰ - (-۴۰))] = -۴۰ + ۰/۷۵ \times (-۲۰) = -۴۰ - ۱۵ = -۵۵\ kPa$$

$\to B = ۱$
خاک اشباع است

یعنی فشار آب حفره‌ای $۵۵\ kPa$ کاهش می‌یابد.

۵۱- (۳)

از آنجاکه نمونه اشباع می‌باشد، پارامتر B اسکمپتون برابر ۱/۰ است و طبق رابطهٔ اسکمپتون، ضریب A نیز به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} A = \dfrac{\Delta u_d}{B\ \Delta\sigma_d} \\ \Delta u_d = u_f - u_{BP} - \Delta u_c = ۴۶۸ - \boxed{۱۵۰} - \boxed{(۵۰۰ - ۳۰۰)} = ۱۱۸\ kPa \end{cases}$$

(۱۵۰ ← پس فشار)
((۵۰۰ − ۳۰۰) ← ناشی از تغییرات تنش همه جانبه در حالت بسته بودن شیرهای زهکشی)

$$\Rightarrow\ A = \frac{۱۱۸}{۱ \times ۲۰۰} = ۰/۵۹$$

۵۲- (۲)

رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را براساس حاکمیت تنش مؤثر در نظر گرفته و می‌نویسیم:

$$\boxed{\sigma'_۱} = \boxed{\sigma'_۳}\ tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) + ۲c'\,tan(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow \sigma'_۱ = \sigma'_۳\, tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) = \sigma'_۳ (\frac{۱ + sin\,\phi'}{۱ - sin\,\phi'})$$

($c' \to ۰$: رس عادی تحکیم یافته)

$\sigma'_۳ \to \sigma_۳ - u_f$

$\sigma'_۱ \to \sigma_۱ - u_f = (\sigma_۳ + \Delta\sigma_d) - u_f$

حال اگر پس فشار و $\sigma_{۳\ \text{اولیه}}$ را از رابطهٔ فوق کنار بگذاریم، خواهیم داشت:

$$\sigma'_۳ = \sigma_۳ - u_f = (۳۰۰ - ۵۰) - (\Delta u_d) = ۲۵۰ - \Delta u_d$$

$$\sigma'_۱ = \sigma_۱ - u_f = (\sigma_۳ + \Delta\sigma_d) - u_f = (\sigma_۳ - u_f) + \Delta\sigma_d = (۲۵۰ - \Delta u_d) + ۳۰۰ = ۵۵۰ - \Delta u_d$$

در ادامه با توجه به مقدار پارامتر A اسکمپتون، می‌توانیم Δu_d را به‌صورت زیر به‌دست اوریم:

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \Rightarrow ۰/۵ = \frac{\Delta u_d}{۳۰۰} \Rightarrow \Delta u_d = ۱۵۰\ kN/m^۲$$

که بر این اساس مقادیر $\sigma'_۳$ و $\sigma'_۱$ برابرند با:

$$\sigma'_۳ = ۲۵۰ - ۱۵۰ = ۱۰۰\ kN/m^۲ \quad , \quad \sigma'_۱ = ۵۵۰ - ۱۵۰ = ۴۰۰\ kN/m^۲$$

در نهایت با جایگذاری در رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی، ϕ' را به‌صورت زیر می‌یابیم:

$$۴۰۰ = ۱۰۰ \times \frac{۱ + sin\,\phi'}{۱ - sin\,\phi'} \Rightarrow sin\,\phi' = ۰/۶ \Rightarrow \phi' = ۳۷^\circ$$

۵۳- (۲)

برای محاسبهٔ چسبندگی خاک در حالت زهکشی نشده (c) باید رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی را با حاکمیت تنش کل به شکل زیر بنویسیم:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45+\frac{\phi}{2}) + 2c\tan(45+\frac{\phi}{2}) \\ 45+\frac{\phi}{2} = \theta = 60^\circ \ , \quad \sigma_3 = 100\ kPa \\ \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d \end{cases}$$

در ادامه مقدار $\Delta\sigma_d$ را با توجه به ضریب A اسکمپتون و $\Delta u_d = 100\ kPa$ در لحظهٔ گسیختگی، به‌دست می‌آوریم و از آنجا σ_1 را محاسبه می‌کنیم:

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \Rightarrow 0/25 = \frac{100}{\Delta\sigma_d} \Rightarrow \Delta\sigma_d = 400\ kPa$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_d = 100 + 400 = 500\ kPa$$

در نهایت نیز با جایگذاری مقادیر فوق در رابطهٔ اولیه، c به‌دست می‌آید:

$$500 = 100\times\tan^2 60 + 2c\tan 60^\circ \Rightarrow 500 = 100\times 3 + 2c\times\sqrt{3} \Rightarrow c = 100\frac{\sqrt{3}}{3}\ kN/m^2$$

۵۴- (۳)

ابتدا با مقایسهٔ خط گسیختگی رسم شده در مختصات (σ_3, σ_1) و رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی، می‌توان گفت:

$$\begin{cases} \sigma_1 = m\sigma_3 + h = 3\sigma_3 + h \\ \sigma_1 = \sigma_3\tan^2\theta + 2c\tan\theta \end{cases} \Rightarrow \tan^2\theta = 3 \Rightarrow \theta = 60^\circ$$

حال رابطهٔ تنش‌های اصلی با تنش‌های قائم و برشی در صفحهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر (برحسب σ_{ave} و R) می‌نویسیم:

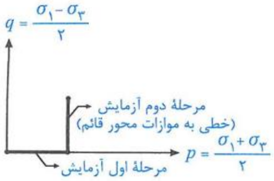
$$\begin{cases} \sigma_f = \sigma_{ave} + R\cos 2\theta \Rightarrow 100 = \sigma_{ave} + R\times \underbrace{\cos(2\times 60^\circ)}_{\cos 120^\circ = -\frac{1}{2}} = \sigma_{ave} - \frac{R}{2} \\ \tau_f = R\sin 2\theta \Rightarrow 40\sqrt{3} = R\times\sin(2\times 60^\circ) = R\frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow R = 80\ kPa \end{cases}$$

$$\Rightarrow 100 = \sigma_{ave} - \frac{80}{2} \Rightarrow \sigma_{ave} = 140\ kPa$$

در نهایت نیز σ_{ave} و R را برحسب تنش‌های اصلی (σ_1 , σ_3) نوشته و آنها را محاسبه می‌کنیم.

$$\begin{cases} \sigma_{ave} = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2} = 140 \Rightarrow \sigma_1+\sigma_3 = 280 \\ R = \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2} = 80 \Rightarrow \sigma_1-\sigma_3 = 160 \end{cases} \Rightarrow \sigma_1 = 220\ kPa \ , \quad \sigma_3 = 60\ kPa$$

۵۵- (۳)



می‌دانیم مسیر تنش در مختصات $\tau-\sigma$ ترسیم نمی‌شود، بلکه در دستگاه $p-q$ رسم می‌گردد.

بنابراین اگر فرض کنیم منظور طراح همان دستگاه مختصات معروف $p = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}$ و $q = \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}$ باشد، ابتدا مسیر تنش ذکر شده را رسم می‌کنیم.

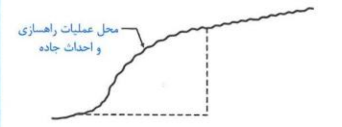
در قسمت مربوط به مرحلهٔ دوم آزمایش مشاهده می‌کنیم که p ثابت است، پس می‌توان نوشت.

$$\Delta p = 0 \Rightarrow \frac{\Delta\sigma_1+\Delta\sigma_3}{2} = 0 \Rightarrow \Delta\sigma_1 = -\Delta\sigma_3$$

یعنی برای حصول به شرایط فوق، بایستی σ_1 و σ_3 تغییراتی مساوی ولی مخالف هم داشته باشند.

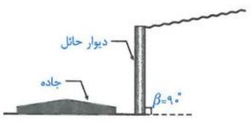
فصل ۹: پایداری شیروانی‌های خاکی

این فصل را با یک مثال عملی شروع می‌کنیم. فرض کنید مطابق شکل روبرو می‌خواهیم با گودبرداری در یک قسمت از عملیات راهسازی، راه را باز کرده و جاده بسازیم:

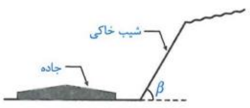


برای این منظور، معمولاً دو راهکار زیر پیشنهاد می شود:

۱) با گودبرداری قائم خاک ($\beta = 90°$) از محل عملیات راهسازی و ساختن یک دیوار نگهبان (حائل)، مانع ریزش خاک شده و سپس جاده را احداث کنیم.



۲) با گودبرداری مایل خاک ($\beta < 90°$) از محل عملیات راهسازی و برداشتن خاکِ بیشتر (به‌جای ساختن دیوار نگهبان)، مانع از ریزش خاک شده و سپس جاده را احداث کنیم.



از بین دو راهکار فوق، احتمالاً روش دوم به علت عدم نیاز به ساخت دیوار نگهبان، اقتصادی و مناسب‌تر است. در واقع ما در این روش با ایجاد یک شیب خاکی مایل، می‌خواهیم مانع از ریزش خاک کنار جاده شویم. اما شیب خاکی چیست؟ همانطورکه ملاحظه می‌کنید اگر سطح زمین با امتداد افق زاویه‌ای غیر از صفر بسازد، در آن‌صورت به سطح شیبدار ایجاد شده یک شیب خاکی یا شیروانی خاکی گفته می‌شود. شیروانی‌های خاکی می‌توانند مانند مثال بالا توسط مهندسین عمران طراحی و ساخته شوند و یا به‌صورت طبیعی و در اثر عواملی چون نیروی باد، آب و ... ایجاد شده باشند.

آنچه در مورد یک شیروانی خاکی مهم بوده و مورد توجه مهندسان عمران است، بحث پایداری آنها در برابر لغزش است. پایداری یک شیروانی خاکی به عوامل متعددی مثل لایه‌بندی خاک، وجود آب زیرزمینی، مقاومت برشی خاک و ... بستگی داشته و لغزش آن می‌تواند به‌صورت ناگهانی و یا تدریجی رخ دهد.

در این فصل می‌خواهیم با تعیین ضریب اطمینان در برابر لغزش، پایداری شیروانی‌ها را در دو حالت شیروانی‌های محدود و نامحدود بررسی و تحلیل کنیم. بر همین اساس این فصل را در قسمت‌های نشان داده شده در نمودار درختی زیر ارائه می‌کنیم:

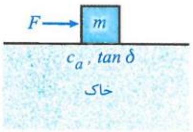
پایداری شیروانی‌های خاکی ◄
- قسمت اول: بررسی پایداری شیروانی‌های خاکی نامحدود
- قسمت دوم: بررسی پایداری شیروانی‌های خاکی محدود
- قسمت سوم: مباحث تکمیلی پایداری شیروانی‌ها

انتشارات سری عمران
www.serieomran.ir

قسمت اول (مروری بر پایداری شیروانی‌های خاکی نامحدود)

A-۱- مفاهیم اولیه

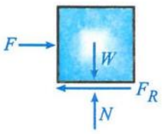
به‌طور کلی در این فصل قصد داریم احتمال لغزیدن در شیروانی‌های خاکی را بررسی کنیم. قبل از شروع این بحث، باید بدانیم که لغزش چیست و ضریب اطمینان در برابر آن چگونه به‌دست می‌آید. برای این منظور شکل زیر را که در آن یک مکعب بتنی بر روی خاک قرار دارد، در نظر بگیرید:



در این شکل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) نیروی افقی F در این مجموعه، قصد لغزاندن مکعب بتنی بر روی خاک را دارد و در واقع نیروی سبب لغزش می‌باشد.

۲) نیروی چسب بین مکعب و خاک که ناشی از c_a است و نیز نیروی اصطکاک بین مکعب و خاک که ناشی از $tan\ \delta$ می‌باشد قصد مقاومت در برابر لغزش این قطعه را دارند، به‌طوری‌که حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش مکعب برابر است با:



$$N\ tan\ \delta + c_a\ A = \text{حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش}$$

که در این رابطه A مساحت سطح تماس مکعب بتنی با خاک بوده و N نیروی عمودی وارد بر مکعب از طرف خاک است که در اینجا برابر وزن مکعب یعنی W می‌باشد.

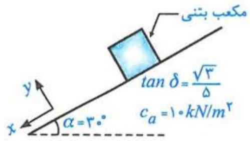
$$\sum F_y = \circ \Rightarrow N = W$$

۳) ضریب اطمینان در برابر لغزش این مکعب، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FS = \frac{\text{حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{نیروی سبب لغزش}} = \frac{N\ tan\ \delta + c_a\ A}{F}$$

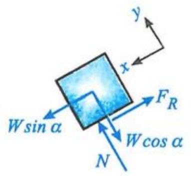
در ادامه با حل دو تمرین، این موضوع را بهتر درک خواهیم کرد.

تمرین ۱: یک مکعب بتنی به وزن مخصوص ۲۵ $kN/m^۳$ و طول ضلع ۱/۰ m، مطابق شکل زیر بر روی یک سطح شیبدار خاکی قرار گرفته و ساکن است. ضریب اطمینان این مکعب در برابر لغزش بر روی سطح شیبدار خاکی را به‌دست آورید. (δ و c_a به‌ترتیب زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی مکعب با سطح شیبدار هستند)



حل: برای حل این تمرین، مراحل زیر را یک به یک طی می‌کنیم:

مرحلهٔ اول: دیاگرام جسم آزاد مکعب را رسم کرده و روابط تعادل نیروها را در امتداد x و y می‌نویسیم:



$$\sum F_x = \circ \Rightarrow F_R = W sin\ \alpha$$
$$\sum F_y = \circ \Rightarrow N = W cos\ \alpha$$

زیر شاخه‌های قسمت اول

A-۱- مفاهیم اولیه
A-۲- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های غیراشباع
A-۳- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های اشباع

مرحلهٔ دوم: حداکثر مقدار نیروهای مقاوم در برابر لغزش و نیز مقدار نیرو یا نیروهایی که قصد لغزاندن مکعب را دارند مشخص می‌کنیم. در این مکعب نیروی $W\sin\alpha$ قصد لغزاندن مکعب بر روی سطح شیبدار را دارد و نیروهای ناشی از اصطکاک و چسبندگی بین مکعب و خاک، نیروهایی هستند که در برابر آن مقاومت می‌کنند، بنابراین می‌نویسیم

$$\text{حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش} = \underbrace{N\tan\delta}_{\text{ناشی از اصطکاک بین مکعب و خاک}} + \underbrace{c_a A}_{\text{ناشی از چسبندگی بین خاک و مکعب}} = (W\cos\alpha)\tan\delta + c_a \times A$$

$$W = \gamma V = ۲۵\times(۱\times۱\times۱) = ۲۵\ kN \Rightarrow \text{حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش} = (۲۵\times\cos ۳۰)\times\frac{\sqrt{۳}}{۵} + ۱۰\times(۱\times۱) = ۱۷/۵\ kN$$

$$\text{نیروی سبب لغزش که با } F_R \text{ برابر است} = W\sin\alpha = ۲۵\times\sin ۳۰ = ۱۲/۵\ kN$$

توجه شود که A در رابطهٔ مربوط به نیروی مقاوم، مساحت وجهی از مکعب است که با خاک در تماس می‌باشد.

مرحلهٔ سوم: ضریب اطمینان در برابر لغزش را به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$FS = \frac{\text{حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{نیروی سبب لغزش}} = \frac{۱۷/۵}{۱۲/۵} = \frac{۷}{۵} = ۱/۴$$

تمرین ۲: یک قطعه بتنی تزئینی مکعب شکل با وزن مخصوص $\gamma = ۲/۵\,t/m^۳$ و به ابعاد $(۱\times۱\times۱)$ مترمکعب، بر روی خاک رس اشباع با مقاومت تک‌محوری $q_u = ۰/۳\ kg/cm^۲$ قرار دارد. درصورتی‌که چسبندگی خاک به بتن بیش از چسبندگی خاک به خاک باشد و زلزله‌ای با ضریب شتاب افقی ۰/۲ رخ دهد:

الف) لغزش در چه محل‌هایی می‌تواند رخ دهد؟ احتمال لغزیدن در کجا بیشتر است؟

ب) پارامترهای مقاومت برشی خاک برای تحلیل لغزش آن در این وضعیت کدام است؟

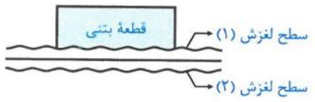
ج) مفهوم ضریب شتاب افقی ۰/۲ را بیان کنید و با کمک آن، نیروی سبب لغزش مکعب را به‌دست آورید.

د) حداکثر مقدار نیروی مقاوم در برابر لغزش مکعب چند تن می‌باشد؟

هـ) ضریب اطمینان در برابر لغزش قطعه بتنی چقدر است؟ (سراسری - ۸۵)

حل:

الف) در این مسئله، لغزش در دو محل می‌تواند رخ دهد:

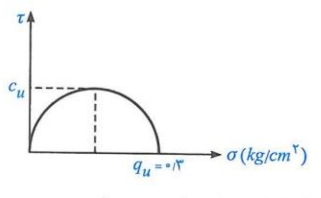


۱- در محل اتصال مکعب تزئینی به خاک

۲- کمی پایین‌تر و در محلی که دو لایه خاک بر روی هم قرار گرفته است.

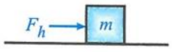
با توجه به صورت سؤال، چسبندگی خاک به بتن بیشتر از چسبندگی خاک به خاک است، بنابراین لغزش در سطحی که بین دو خاک قرار دارد (سطح ۲)، محتمل‌تر است. (توجه کنید که در این سؤال فقط چسبندگی مطرح است و بحث اصطکاک مطرح نیست. علت این موضوع را در قسمت ب خواهید دید.)

ب) با توجه به اشباع بودن خاک رس و بارگذاری سریع زلزله در سطح خاک، پارامترهای مقاومت برشی مورد استفاده در این حالت بر مبنای آزمایش تک محوری بوده و عبارت‌اند از:



$$\Rightarrow \begin{cases} \phi_u = ۰ \\ c_u = \dfrac{q_u}{۲} = \dfrac{۰/۳}{۲} = ۰/۱۵\ kg/cm^۲ = ۱/۵\ t/m^۲ \end{cases}$$

ج) وقتی می‌گوییم ضریب شتاب افقی زلزله ۰/۲ است، یعنی شتاب افقی زلزله ۰/۲ برابر شتاب گرانش (g) است که با توجه به این موضوع نیروی سبب لغزش برابر می‌شود با:



$$\begin{cases} F_h = m\times a = m\times(۰/۲g) = ۰/۲(\underbrace{mg}_{W}) \\ W = \gamma_{\text{مکعب}} V = ۲/۵\times(۱\times۱\times۱) = ۲/۵\ ton \end{cases} \Rightarrow F_h = ۰/۲\times۲/۵ = ۰/۵\ ton$$

د) حداکثر مقدار نیروی مقاوم در برابر لغزشِ لایه‌های خاک (سطح ۲)، ناشی از چسبندگی c_u بوده و داریم:

$$F_{R_{max}} = N\tan\phi_u + c_u A = N \times ۰ + ۱/۵ \times (۱\times۱) = ۱/۵\ ton$$

سطح لغزش خاک بر روی خاک (در ناحیهٔ زیر مکعب)

ه) با توجه به قسمت‌های (ج) و (د)، ضریب اطمینان در برابر لغزش به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

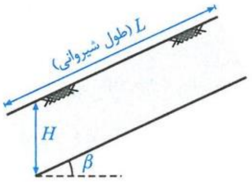
$$FS = \frac{\text{حداکثر نیروی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{نیروی سبب لغزش}} = \frac{۱/۵}{۰/۵} = ۳$$

تذکر: برای محاسبهٔ ضریب اطمینان در برابر لغزشِ یک لایهٔ خاک بر روی یک لایه خاک دیگر (مثل تمرین قبل)، معمولاً ابتدا تنش برشی که قصد ایجاد لغزش را دارد (τ) محاسبه می‌کنیم و سپس حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش ($\tau_f = \sigma\tan\phi + c$) را به‌دست آورده و در نهایت به‌صورت زیر FS را می‌یابیم:

$$FS = \frac{\text{حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{تنش برشی سبب لغزش}}$$

A-۲- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های غیر اشباع

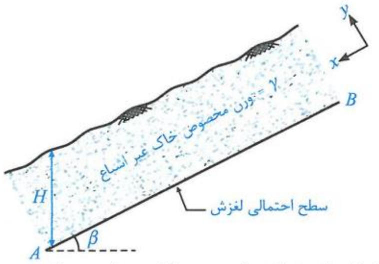
به‌طور کلی **شیروانی خاکی نامحدود**، به شیروانی گفته می‌شود که طول آن در مقایسه با ارتفاعش زیاد است (در عمل اگر طول شیروانی تقریباً از ۱۰ برابر ارتفاع آن بیشتر باشد، می‌توان شیروانی را نامحدود در نظر گرفت).



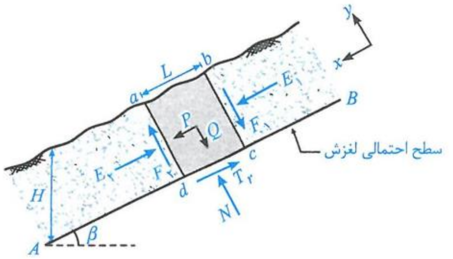
در اینگونه شیروانی‌ها، ضریب اطمینان در برابر لغزش را در دو حالت اشباع و غیراشباع بررسی می‌کنیم که ابتدا در این بخش به حالت غیر اشباع می‌پردازیم و سپس در بخش بعدی حالت اشباع را مورد توجه قرار می‌دهیم.

شیروانی‌های غیر اشباع

شکل مقابل را که یک شیروانی خاکی نامحدود (از روی شکل، حداقل یک طرف آن نامعلوم می‌باشد) و غیراشباع است، در نظر بگیرید. در این شکل، سطح AB یک سطح محتمل برای لغزش است که موازی سطح شیبدار می‌باشد. در ضمن فرض کرده‌ایم که حرکت آب در خاک، در این شیب خاکی وجود ندارد.



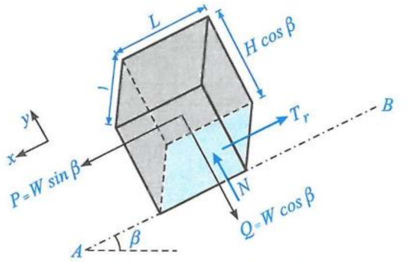
برای بررسی پایداری این شیروانی در امتداد سطح لغزش AB (که در عمق H از سطح زمین قرار دارد)، لازم است تا از مفاهیمی که در ابتدای این فصل یاد گرفتیم استفاده کنیم. به‌همین منظور، قطعه $abcd$ را مطابق شکل روبرو در نظر می‌گیریم:



در شکل بالا:

- P و Q به‌ترتیب نیروهای **پیش‌برنده** و **فشاردهنده** قطعه نامیده می‌شوند و حاصل تجزیه نیروی وزن قطعهٔ $abcd$ در دو امتداد x و y می‌باشند، یعنی: $P = W\sin\beta$ ، $Q = W\cos\beta$
- T_r و N مؤلفه‌های نیروی عکس‌العمل وارده به قطعهٔ $abcd$ در امتدادهای x و y می‌باشند که در ادامهٔ بحث در مورد آنها بیشتر صحبت می‌کنیم.
- E و F نیروهای مؤثر بر وجوه کناری قطعهٔ $abcd$ در امتدادهای x و y می‌باشند که ثابت می‌شود برای یک شیب خاکی یکنواخت و نامحدود، $F_۱ = F_۲$ و $E_۱ = E_۲$ است.

در ادامه با توجه به توضیحات داده شده، ابتدا دیاگرام جسم آزاد قطعه $abcd$ را با فرض بعد عمود بر صفحهٔ واحد* رسم کرده و سپس با بررسی چند سؤال نسبتاً ساده، ضریب اطمینان پایداری شیروانی را تعیین می‌کنیم:

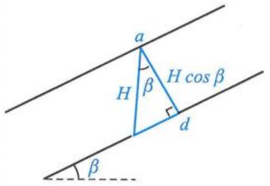


بررسی چند سوال

سؤال ۱: وزن قطعهٔ $abcd$ با در نظر گرفتن γ به‌عنوان وزن مخصوص خاک، چقدر است؟

پاسخ: $W = V_{abcd} \times \gamma = (L \times 1 \times H\cos\beta) \times (\gamma) = \gamma LH\cos\beta$

دقت: اگر ارتفاع کل شیروانی خاکی برابر H باشد، در آن صورت ad برابر $H\cos\beta$ است.



سؤال ۲: مقدار نیروهای پیش‌برنده (P) و فشاردهندهٔ (Q) براساس مقدار نیروی وزن چقدر است؟

پاسخ: P و Q مؤلفه‌های نیروی وزن در امتداد x و y هستند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{cases} P = W\sin\beta = \gamma LH\cos\beta \times \sin\beta = \gamma LH\cos\beta\sin\beta \\ Q = W\cos\beta = \gamma LH\cos\beta \times \cos\beta = \gamma LH\cos^2\beta \end{cases}$$

سؤال ۳: مقدار نیروی سبب لغزش چقدر است و تنش برشی ایجاد شده ناشی از آن چگونه محاسبه می‌شود؟

پاسخ: نیروی $P = W\sin\beta$ قصد لغزش قطعه در راستای سطح شیبدار را دارد و تنش برشی ناشی از آن با تقسیم نیروی فوق بر مساحت تماس قطعهٔ $abcd$، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

نیروی سبب لغزش ← $W\sin\beta$

$$\tau = \frac{W\sin\beta}{A} \Rightarrow \tau = \frac{\gamma LH\cos\beta\sin\beta}{L \times 1} = \gamma H\cos\beta\sin\beta$$

τ ← تنش برشی که سبب لغزش می‌شود.

سؤال ۴: حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش چگونه محاسبه می‌شود؟

پاسخ: همانطور که در فصل قبل دیدیم، حداکثر تنش برشی مقاوم، همان مقاومت برشی خاک است و مقدار آن براساس رابطهٔ مور- کولمب به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\tau_f = \sigma\tan\phi + c \quad , \quad \sigma = \frac{N}{A} = \frac{W\cos\beta}{A} = \frac{\gamma LH\cos^2\beta}{L \times 1} = \gamma H\cos^2\beta \Rightarrow \tau_f = \gamma H\cos^2\beta\tan\phi + c$$

σ ← تنش قائم در صفحهٔ محتمل به لغزش

سؤال ۵: ضریب اطمینان در برابر لغزش در این حالت چگونه محاسبه می‌شود؟

پاسخ: همانطورکه گفتیم، ضریب اطمینان در برابر لغزش حاصل تقسیم حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش به تنش برشی سبب لغزش است، بنابراین می‌توان نوشت:

$$FS = \frac{\text{حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{تنش برشی سبب لغزش}} = \frac{\tau_f}{\tau}$$

حال اگر مقادیر به‌دست آمده برای τ_f و τ را در رابطهٔ بالا جایگذاری کنیم، خواهیم داشت:

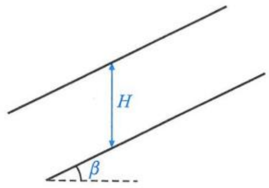
$$FS = \frac{\gamma H\cos^2\beta\tan\phi + c}{\gamma H\cos\beta\sin\beta} \Rightarrow FS = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} + \frac{c}{\gamma H\cos\beta\sin\beta}$$

* بعد عمود بر صفحه را برابر واحد در نظر می‌گیریم، هر چند در ادامه خواهید دید که اگر آن را برابر واحد هم در نظر نگیریم، تغییری در نتایج نهایی به‌وجود نمی‌آید.

نتایج کاربردی:

از بحث مطرح شده در صفحهٔ قبل، نکات جالب و مهمی برداشت می‌شود که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم:

۱) همانطور که مشاهده می‌کنید، رابطهٔ ضریب اطمینان از دو جمله تشکیل شده است که جملهٔ اول، ترم وابسته به زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک بوده و جملهٔ دوم، ترم وابسته به چسبندگی خاک است.



۲) احتمالاً خودتان نیز احساس می‌کنید که در شیروانی‌های خاکی نامحدود، دو عامل زیر احتمال لغزیدن شیروانی را افزایش می‌دهند:

الف) افزایش زاویهٔ شیب خاکی نسبت به افق (β)

ب) افزایش ارتفاع شیروانی (عمق سطح لغزش یا همان H)

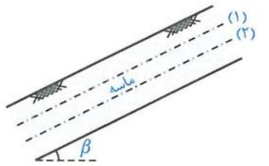
این موضوع با کمک رابطهٔ FS نیز به‌سادگی قابل توجیح است:

$$\underbrace{FS}_{\text{کاهش}} = \frac{\tan\phi}{\underbrace{\tan\beta}_{\text{افزایش}}} + \frac{c}{\gamma\ \underbrace{H}_{\text{افزایش}}\ \cos\beta\sin\beta}$$

۳) اگر خاک شیروانی از نوع دانه‌ای باشد ($c=0$)، در آن‌صورت ترم چسبندگی صفر بوده و ضریب اطمینان در برابر لغزش برابر است با:

$$FS = \frac{\tan\phi}{\tan\beta}$$

رابطهٔ بالا نشان می‌دهد که در شیروانی‌های درست شده از خاک دانه‌ای، ضریب اطمینان در برابر لغزش مستقل از عمق سطح لغزش بوده و تنها به مقادیر ϕ و β بستگی دارد. با توجه به این موضوع به عنوان یک نکتهٔ بسیار جالب می‌توان نتیجه گرفت که در یک شیروانی ماسه‌ای مثل شکل روبرو، ضریب اطمینان در سطوح (۱) و (۲) با هم برابر است.

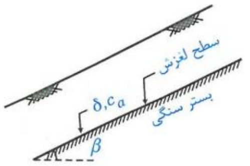


$$\Rightarrow FS_1 = FS_2$$

۴) اگر ضریب اطمینان شیروانی مساوی یک باشد، شیروانی در آستانهٔ لغزش قرار می‌گیرد. ($FS < 1$ یعنی حداکثر تنش برشی مقاوم، از تنش برشی سبب لغزش کمتر بوده و شیروانی می‌لغزد) در این حالت ارتفاع شیروانی را **ارتفاع بحرانی** نامیده و آن را با H_{cr} نشان می‌دهیم. برای محاسبهٔ ارتفاع بحرانی شیروانی خاکی فقط کافی است تا ضریب اطمینان را مساوی یک قرار داده و مقدار H را بیابید:

$$FS=1 \Rightarrow 1=\frac{\tan\phi}{\tan\beta}+\frac{c}{\gamma H_{cr}\cos\beta\sin\beta} \Rightarrow H_{cr}=\frac{c}{\gamma}\left[\frac{1}{\cos^2\beta(\tan\beta-\tan\phi)}\right]$$

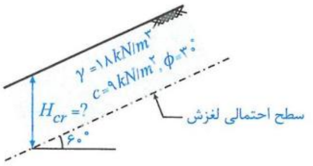
۵) اگر شیروانی خاکی روی یک بستر سنگی قرار گیرد، در آن‌صورت این بستر سنگی محتمل‌ترین سطح لغزش برای شیب خاکی خواهد بود. در این شرایط بایستی در رابطهٔ محاسبهٔ ضریب اطمینان، در صورت کسر به‌جای ϕ و c از δ و c_a استفاده کرد که به‌ترتیب زاویه اصطکاک بین خاک و بستر سنگی و چسبندگی بین خاک و سنگ هستند.



$$FS=\frac{\sigma\tan\delta+c_a}{\tau}$$

در ادامه با حل چند تمرین متنوع، بر روی مباحث مطرح شده، بیشتر مسلط می‌شویم.

تمرین ۳: شیروانی نامحدود مقابل در آستانه لغزش قرار دارد. ارتفاع شیروانی چقدر است؟ (برحسب متر)



۱) $\sqrt{3}$
۲) $2\sqrt{3}$
۳) $\frac{\sqrt{3}}{2}$
۴) $\frac{\sqrt{3}}{3}$

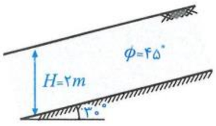
حل: با توجه به روندی که در این قسمت یاد گرفتیم، ابتدا رابطهٔ FS را نوشته و سپس برای به‌دست آوردن H_{cr}، آن را برابر یک قرار می‌دهیم:

$$FS=\frac{\sigma\tan\phi+c}{\tau}=\frac{\gamma H_{cr}\cos^{۲}\beta\tan\phi+c}{\gamma H_{cr}\cos\beta\sin\beta}=۱\Rightarrow\frac{۱۸\times H_{cr}\times\cos^{۲}۶۰^\circ\times\tan۳۰^\circ+۹}{۱۸\times H_{cr}\times\cos۶۰^\circ\times\cos۶۰^\circ}=۱$$

$$۱/۵\sqrt{۳}\,H_{cr}+۹=۴/۵\sqrt{۳}\,H_{cr}\Rightarrow H_{cr}=\frac{۹}{۳\sqrt{۳}}=\sqrt{۳}$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۴: **در شیروانی خاکی دانه‌ای و نامحدود شکل زیر که بر روی یک بستر سنگی قرار دارد، ضریب اطمینان در برابر لغزش کدام است؟** $(\delta=\frac{۲}{۳}\phi)$



۱) ۱

۲) $\frac{۲}{\sqrt{۳}}$

۳) $\frac{\sqrt{۳}}{۲}$

۴) به ارتفاع H بستگی دارد.

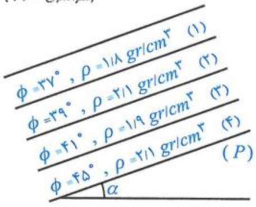
حل: همانطور که گفتیم، در خاک‌های دانه‌ای در حالت غیراشباع، ضریب اطمینان شیروانی در مقابل لغزش از رابطه $FS=\frac{\tan\phi}{\tan\beta}$ به‌دست می‌آید، ولی در این سؤال با توجه به قرارگیری شیب خاکی روی سنگ، صورت کسر در رابطهٔ ضریب اطمینان اندکی تغییر کرده و در نهایت مقدار FS برابر است با:

$$FS=\frac{\tan\delta}{\tan\beta}=\frac{\tan(\frac{۲}{۳}\times۴۵^\circ)}{\tan۳۰^\circ}=۱$$

بنابراین گزینهٔ (۱) صحیح است.

تمرین ۵: **در شکل مقابل روی صفحه شیبدار (P) با زاویه α، چهار لایه خاک اصطکاکی هر کدام به ضخامت ۱ متر و مشخصات داده شده وجود دارند و در سطح شیبدار $\tan\delta=۰/۸\tan\phi$ می‌باشد. (δ زاویه اصطکاک خاک و صفحه شیبدار است.) زاویه α را به تدریج زیاد می‌کنیم. ترتیب ریزش لایه‌ها به کدام صورت است؟** $(\tan۳۸/۷^\circ=۰/۸)$

(سراسری - ۷۶)



۱) اول لایه ۱ و بعد تمام لایه‌ها باهم

۲) به ترتیب ۱ و ۲ در ابتدا و سپس ۳ و ۴

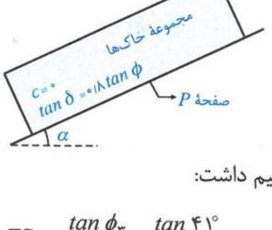
۳) به ترتیب ۱ و ۲ و ۳ و ۴

۴) هر چهار لایه باهم

حل: چون خاک‌ها اصطکاکی هستند، بنابراین $c=۰$ بوده و ضریب اطمینان در برابر لغزش به راحتی (مثل تمرین قبل) به‌دست می‌آید:

- **ضریب اطمینان لغزش خاک (۴) روی صفحهٔ P:**

برای این منظور، خاک (۴) را با خاک‌های بالایی به‌صورت یکپارچه فرض کرده و $FS_{۴}$ را به‌صورت زیر می‌یابیم:



$$FS_{۴}=\frac{\tan\delta}{\tan\alpha}=\frac{۰/۸\tan۴۵^\circ}{\tan\alpha}=\frac{\tan۳۸/۷}{\tan\alpha}$$

($۰/۸\tan۴۵^\circ\rightarrow۰/۸$)

در ادامه برای محاسبهٔ ضریب اطمینان خاک‌ها بر روی هم، به‌سادگی از رابطهٔ $\frac{\tan\phi}{\tan\alpha}$ استفاده کرده و خواهیم داشت:

- **ضریب اطمینان لغزش خاک (۳) بر روی خاک (۴):** $FS_{۳}=\frac{\tan\phi_{۳}}{\tan\alpha}=\frac{\tan۴۱^\circ}{\tan\alpha}$

- **ضریب اطمینان لغزش خاک (۲) بر روی خاک (۳):** $FS_{۲}=\frac{\tan\phi_{۲}}{\tan\alpha}=\frac{\tan۳۹^\circ}{\tan\alpha}$

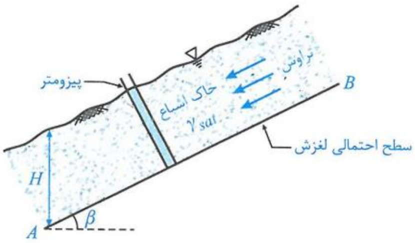
- **ضریب اطمینان لغزش خاک (۱) بر روی خاک (۲):** $FS_{۱}=\frac{\tan\phi_{۱}}{\tan\alpha}=\frac{\tan۳۷^\circ}{\tan\alpha}$

از مقایسهٔ نتایج فوق می‌توان گفت: $FS_1 < FS_4 < FS_2 < FS_3$

پس با زیاد شدن زاویه α، ابتدا خاک (۱) و بعد خاک شماره (۴) ریزش می‌کند. اما توجه کنید که خاک‌های (۳) و (۲) روی خاک (۴) هستند، بنابراین اگر خاک (۴) ریزش کند، عملاً خاک‌های (۲) و (۳) نیز که روی آنها هستند ریزش می‌کنند. نتیجه آنکه پس از خاک (۱)، خاک‌های (۴) و (۳) و (۲) با هم ریزش خواهند داشت و می‌توان گفت گزینهٔ (۱) درست است.

A-۳- تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های اشباع

بیایید مشابه با حالت قبل (بخش $A-2$) یک شیروانی خاکی را در نظر بگیریم، با این تفاوت که این بار خاک اشباع است و آب در خاک جریان دارد (سطح آب منطبق بر سطح خاک فرض می‌شود). در ادامه مجدداً بحث لغزش شیروانی را در امتداد صفحهٔ AB به‌عنوان سطح لغزش احتمالی بررسی می‌کنیم.



در این قسمت نیز مانند حالت خاک غیراشباع، قطعه $abcd$ را مطابق شکل زیر جدا کرده و سپس دیاگرام نیروهای وارد بر آن را ترسیم می‌کنیم:

در ادامه می‌خواهیم با بررسی چند سؤال، ضریب اطمینان پایداری شیروانی را (این بار در حالت اشباع) تعیین کنیم. قبل از شروع این سؤالات، یادآوری یک موضوع مهم از فصل حرکت آب در خاک (تمرین ۶ در فصل ۴) ضروری است:

یادآوری: اگر H ارتفاع شیروانی یا همان عمق سطح لغزش از سطح زمین باشد، در آن صورت فشار آب حفره‌ای در سطح لغزش برابر خواهد بود با: $u = \gamma_w H \cos^2\beta$

بررسی چند سوال

سؤال ۱: در حالت شیروانی اشباع مقدار نیروی سبب لغزش چقدر است و تنش برشی ناشی از آن چگونه محاسبه می‌شود؟

● **پاسخ:** مجدداً مؤلفهٔ نیروی وزن قطعه $abcd$ در راستای سطح شیبدار، قصد لغزاندن آن را بر روی سطح شیبدار دارد و می‌توان نوشت:

$$\text{نیروی سبب لغزش} = W\sin\beta = [(\gamma_{sat})(L\times 1\times H\cos\beta)]\times\sin\beta = \gamma_{sat} LH\cos\beta\sin\beta$$

$$\text{تنش برشی که سبب لغزش می‌شود}: \tau = \frac{\text{نیروی سبب لغزش}}{\text{مساحت سطح لغزش}} = \frac{\gamma_{sat} LH\cos\beta\sin\beta}{L\times 1} = \gamma_{sat} H\cos\beta\sin\beta$$

سؤال ۲: تنش قائم کل و مؤثر در صفحهٔ لغزش چگونه تعیین می‌شود؟

● **پاسخ:** ما می‌توانیم با استفاده از اصل تنش مؤثر (که در فصل پنجم خواندید) و دانستن مقادیر تنش کل σ و فشار آب حفره‌ای (که در یادآوری گفتیم) در سطح لغزش، مقدار تنش مؤثر σ' را در این سطح به‌صورت زیر به‌دست آوریم:

محاسبهٔ σ و N:

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N = W\cos\beta = [(\gamma_{sat})(L\times 1\times H\cos\beta)]\times\cos\beta = \gamma_{sat} LH\cos^2\beta$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{W\cos\beta}{A} = \frac{\gamma_{sat} LH\cos^2\beta}{L\times 1} = \gamma_{sat} H\cos^2\beta$$

محاسبهٔ σ':

$$\sigma' = \sigma - u = \gamma_{sat} H\cos^2\beta - \gamma_w H\cos^2\beta = (\gamma_{sat} - \gamma_w) H\cos^2\beta \xrightarrow{\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w} \sigma' = \gamma' H\cos^2\beta$$

سؤال ۳: ضریب اطمینان در برابر لغزش چگونه محاسبه می‌شود؟

پاسخ: برای محاسبهٔ ضریب اطمینان شیروانی در برابر لغزش به هنگام تراوش آب، بسته به حاکم بودن تنش مؤثر یا تنش کل، یکی از دو حالت زیر اتفاق می‌افتد:

حالت ۱ (حاکم بودن تنش مؤثر): این حالت مخصوص **خاک‌های دانه‌ای (مثل ماسه) و رس‌ها در دراز مدت** است و در آن لغزش تدریجی شیروانی بررسی می‌شود. در این شرایط ضمن آنکه در رابطه مقاومت برشی (مور- کولمب) از σ' استفاده می‌کنیم، پارامترهای مقاومت برشی نیز در این رابطه به‌صورت مؤثر یعنی c' و ϕ' به‌کار می‌روند:

$$FS=\frac{\tau_f}{\tau}=\frac{\sigma' \tan\phi'+c'}{\tau}=\frac{\gamma' H\cos^2\beta\tan\phi'+c'}{\gamma_{sat}H\cos\beta\sin\beta}\Rightarrow FS=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)+\frac{c'}{\gamma_{sat}H\cos\beta\sin\beta}$$

حالت ۲ (حاکم بودن تنش کل): این حالت مخصوص **خاک‌های رسی در کوتاه مدت** است (یعنی خاک رس اشباع در شرایط $\phi=0$) و در آن لغزش ناگهانی شیروانی بررسی شود. در این شرایط اولاً در رابطهٔ مقاومت برشی بایستی از تنش کل یعنی σ استفاده شود، ثانیاً پارامترهای مقاومت برشی خاک به‌صورت $\phi=0$ و $c=c_u$ به‌کار می‌روند:

$$FS=\frac{\tau_f}{\tau}=\frac{\sigma\tan\phi+c}{\tau}=\frac{\gamma_{sat}H\cos^2\beta\times 0+c_u}{\gamma_{sat}H\cos\beta\sin\beta}\Rightarrow FS=\frac{c_u}{\gamma_{sat}H\cos\beta\sin\beta}$$

البته در کنکور، بیشتر سؤالات از حالت اول طرح شده است.

از بحث فوق، نکات مهمی را می‌توان نتیجه گرفت که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم:

۱) در خاک‌های دانه‌ای، همواره تنش مؤثر حاکم بوده و چسبندگی خاک برابر صفر است ($c'=0$)، بنابراین رابطهٔ ضریب اطمینان به‌صورت زیر در می‌آید:

$$FS=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)$$

از آنجائی‌که در بیشتر خاک‌های دانه‌ای $\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\approx 0/5$ می‌باشد (چرا؟)، می‌توان گفت در یک شیروانی خاک با مصالح دانه‌ای، مقدار ضریب اطمینان برابر است با:

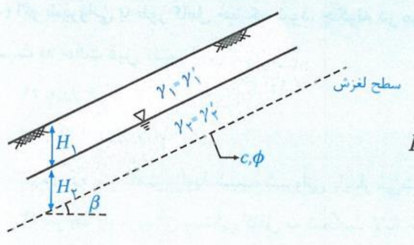
$$FS\approx 0/5\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)$$

۲) در این حالت نیز مانند شیروانی‌های غیراشباع می‌توانیم ضریب اطمینان را مساوی یک قرار داده و ارتفاع بحرانی را بیابیم:

$$FS=1\Rightarrow 1=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)+\frac{c'}{\gamma_{sat}H_{cr}\cos\beta\sin\beta}\Rightarrow H_{cr}=\frac{c'}{\cos^2\beta}\left[\frac{1}{\gamma_{sat}\tan\beta-\gamma'\tan\phi'}\right]$$

یک بحث کاربردی

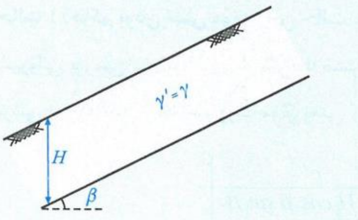
اگر شیروانی خاکی از چند لایه خاک با وزن مخصوص‌های متفاوت تشکیل شده باشد، در آن‌صورت ضریب اطمینان پایداری شیروانی در برابر لغزش به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:



$$FS=\frac{\text{حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{تنش برشی سبب لغزش}}=\frac{(\sum\gamma' H\cos^2\beta)\tan\phi+c}{(\sum\gamma H\cos\beta\sin\beta)}$$

درک درست از این رابطه، عملاً ما را از حفظ کردن فرمول‌های گفته شدهٔ قبلی بی‌نیاز می‌کند. برای تصدیق این موضوع، به حالت‌های خاص این رابطه دقت کنید:

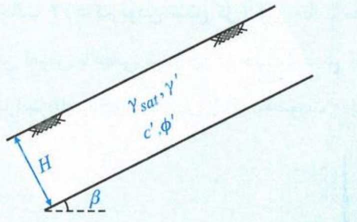
حالت خاص ۱ (یک لایه خاک خشک):



$$\begin{cases}(\tau_f) \text{ حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش } = (\gamma H\cos^2\beta)\tan\phi + c \\ (\tau) \text{ تنش برشی سبب لغزش } = \gamma H\cos\beta\sin\beta\end{cases}$$

$$FS=\frac{\tau_f}{\tau}=\frac{(\gamma H\cos^2\beta)\tan\phi+c}{\gamma H\cos\beta\sin\beta}=\frac{\tan\phi}{\tan\beta}+\frac{c}{\gamma H\cos\beta\sin\beta}$$

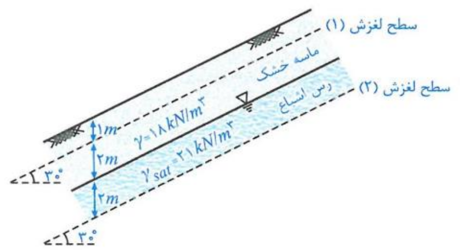
حالت خاص ۲ (یک لایه خاک اشباع):



$$\begin{cases}(\tau_f) \text{ حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش } = (\gamma' H\cos^2\beta)\tan\phi' + c' \\ (\tau) \text{ تنش برشی سبب لغزش } = \gamma_{sat} H\cos\beta\sin\beta\end{cases}$$

$$FS=\frac{\tau_f}{\tau}=\frac{(\gamma' H\cos^2\beta)\tan\phi'+c'}{\gamma_{sat} H\cos\beta\sin\beta}=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)+\frac{c'}{\gamma_{sat} H\cos\beta\sin\beta}$$

همانطور که مشاهده کردید، این دیدگاه کاربرد بسیار خوبی در تحلیل شیروانی‌های نامحدود دارد.



تمرین ۶: شکل روبرو یک شیروانی خاکی نامحدود را نشان می‌دهد که از دو لایه خاک یکی رس اشباع ($\phi'=30^\circ$, $c'=17\sqrt{3}\ kN/m^2$) و دیگری ماسهٔ خشک ($\phi=37^\circ$) تشکیل شده است. ضریب اطمینان پایداری شیروانی در برابر لغزش تدریجی سطوح (۱) و (۲) را به‌دست آورید. ($\sin 37^\circ=0/6$ و $\gamma_w=10\ kN/m^3$)

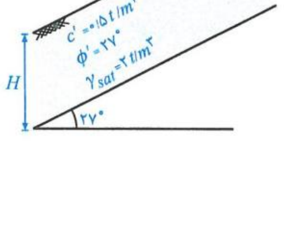
حل: در این سؤال لغزش تدریجی شیروانی مطرح شده است، بنابراین در مورد خاک رس اشباع شرایط دراز مدت با حاکمیت تنش مؤثر را بررسی می‌کنیم و در خاک ماسه‌ای نیز تکلیف معلوم است و می‌نویسیم:

$$\begin{cases}FS_1=\frac{\tan\phi}{\tan\beta}\ \text{(ماسهٔ خشک)} \Rightarrow FS_1=\frac{\tan 37^\circ}{\tan 30^\circ}=\frac{0/75}{\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right)}=\frac{3\sqrt{3}}{4} \\ FS_2=\frac{(\sum\gamma' H\cos^2\beta)\tan\phi'+c'}{(\sum\gamma H\cos\beta\sin\beta)}=\frac{(18\times3+11\times2)\cos^2 30^\circ\times\tan30^\circ+17\sqrt{3}}{(18\times3+21\times2)\cos30^\circ\sin30^\circ}=1/5\end{cases}$$

تمرین ۷: شیروانی نامحدودی در شرایط اشباع با مشخصات زیر مدنظر است.

الف) شرایط پایداری آن در وضع موجود چگونه است؟ (سراسری - ۷۹)

ب) اگر شیروانی به‌طور کامل خشک شود، چگونه در مورد پایداری آن اظهارنظر می‌کنید؟ (در این حالت فرض کنید پارامترهای مقاومت برشی نسبت به حالت قبل تغییر نمی‌کنند)



۱) پایدار است.

۲) ناپایدار است.

۳) در صورت کاهش زاویهٔ شیب، شیروانی پایدار می‌شود.

۴) شرایط پایداری آن بستگی کامل به ضخامت لایهٔ خاک دارد.

حل: با توجه به مطالبی که یاد گرفتیم، به بررسی دو حالت مطرح شده می‌پردازیم:

الف) وضعیت موجود (اشباع):

$$FS = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}) + \frac{c'}{\gamma_{sat}\ H\cos\beta\sin\beta} = (\frac{۲-۱}{۲})(\frac{\tan ۲۷^\circ}{\tan ۲۷^\circ}) + \frac{۰/۵}{۲\times H\times\cos ۲۷^\circ\ \sin ۲۷^\circ} = \frac{۱}{۲} + \frac{۰/۵}{H\sin ۵۴^\circ}$$

در رابطهٔ فوق با توجه به مقدار H، FS می‌تواند بزرگتر، مساوی یا کوچکتر از یک شود و شرایط پایداری آن کاملاً بستگی به ضخامت لایهٔ خاک دارد و گزینهٔ (۴) درست است.

ب) وضعیت خشک شیروانی:

$$FS = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} + \frac{c}{\gamma H\cos\beta\sin\beta} = \frac{\tan ۲۷^\circ}{\tan ۲۷^\circ} + \frac{۰/۵}{\gamma H\cos ۲۷^\circ\ \sin ۲۷^\circ} = ۱ + \frac{۱}{\gamma H\sin ۵۴^\circ} > ۱$$

یعنی شیروانی پایدار می‌شود و در حالت جدید گزینه (۱) درست است.

تمرین ۸: نمونه بازسازی شده از مصالح یک شیروانی ماسه‌ای با شیب ۲۰ درجه، در آزمایش برش مستقیم تحت فشار افقی $۲kg/cm^۲$ و فشار قائم $۲/۴kg/cm^۲$ گسیخته شده است. براساس آزمایشات دیگر، توده ویژه (G_s) این مصالح ۲/۶ و تخلخل آنها ۰/۶ به‌دست آمده است. اگر در اثر بارندگی طولانی مدت این شیروانی کاملاً اشباع شود، ضریب اطمینان آن در برابر ناپایداری چقدر خواهد بود؟ $(\tan ۲۰^\circ = ۰/۳۶)$ (سراسری - ۸۸)

۱) ۱/۱۰ ۲) ۱/۱۵ ۳) ۱/۲۰ ۴) ۱/۲۵

حل: برای خاک ماسه‌ای، $c = c' = ۰$ است و مقدار $\tan\phi$ را با کمک نتایج آزمایش برش مستقیم که در صورت سؤال داده شده است، می‌یابیم:

$$\tau = \sigma\tan\phi + c \Rightarrow ۲ = ۲/۴\times\tan\phi + ۰ \Rightarrow \tan\phi = \frac{۱}{۱/۲} = ۰/۸۳ \xrightarrow{\phi=\phi'} \tan\phi' = ۰/۸۳$$

از طرفی می‌دانیم در خاک‌های ماسه‌ای $\phi = \phi'$ است، بنابراین با استفاده از رابطهٔ ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های ماسه‌ای در حالت اشباع می‌نویسیم:

$$\begin{cases} FS = \dfrac{\gamma'}{\gamma_{sat}}(\dfrac{\tan\phi'}{\tan\beta}) \\ \gamma_{sat} = \dfrac{G_s + e}{1+e}\gamma_w = \dfrac{۲/۶+۰/۶}{۱+۰/۶}\times ۱ = ۲\ t/m^۳ \end{cases} \Rightarrow FS = (\frac{۲-۱}{۲})(\frac{\tan\phi'}{\tan ۲۰^\circ}) = \frac{۱}{۲}(\frac{۰/۸۳}{۰/۳۶}) \simeq ۱/۱۵$$

پس گزیه (۲) پاسخ درست این تست است.

تمرین ۹: در یک شیروانی خاکی از جنس رس صرفاً چسبنده، حداقل مقدار عمق بحرانی چقدر است؟

حل: همانطور که می‌دانید، برای محاسبهٔ عمق بحرانی کافی است تا ضریب اطمینان را مساوی یک قرار دهیم:

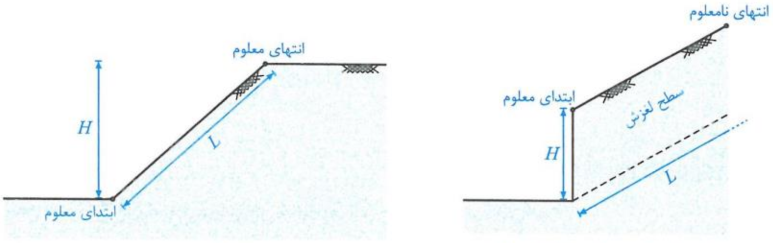
$$FS = \frac{c_u}{\gamma_{sat}\ H_{cr}\sin\beta\cos\beta} = ۱ \Rightarrow H_{cr} = \frac{c_u}{\gamma_{sat}\sin\beta\cos\beta} = \frac{۲c_u}{\gamma_{sat}\sin ۲\beta}$$

از سوی دیگر عبارت فوق زمانی مینیمم می‌شود که مخرج آن ماکزیمم شود، بنابراین به‌ازای $\sin ۲\beta = ۱$ یا $\beta = ۴۵^\circ$، عمق بحرانی مینیمم به‌دست می‌آید:

$$\beta = ۴۵^\circ \Rightarrow \sin ۲\beta = ۱ \Rightarrow H_{cr_{min}} = \frac{۲c_u}{\gamma_{sat}}$$

قسمت دوم: پایداری شیروانی‌های خاکی محدود

اگر شیب خاکی دارای طول محدود و ارتفاع مشخصی باشد، در آن‌صورت یک شیروانی خاکی محدود خواهیم داشت. در **شیروانی‌های خاکی محدود**، بر خلاف شیروانی‌های نامحدود، ابتدا و انتهای شیروانی از روی شکل قابل تشخیص است:



شیروانی محدود

شیروانی نامحدود که حداقل یک طرف آن از روی شکل نامعلوم است.

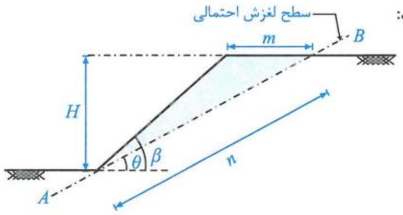
در تحلیل یک شیروانی خاکی محدود با مصالح همگن، باید یک شکل عمومی برای سطح لغزش بحرانی در نظر گرفته شود تا تحلیل پایداری آن ساده شود. اگرچه شواهد قابل توجهی برای منحنی بودن سطح لغزش وجود دارد ولی صفحه‌ای فرض کردن سطح لغزش در مواردی چون شیروانی‌های قائم، سدهای خاکی با مصالح دانه‌بندی شده و ... نیز نتایج خوبی داشته است.

سطح لغزش صفحه‌ای، در سال ۱۸۷۵ توسط محققی به‌نام کولمان مدنظر قرار گرفت ولی در سال ۱۹۲۰ یک گروه ژئوتکنیک سوئدی، **سطح لغزش واقعی را به‌صورت استوانه‌ای (دایره‌ای)** پیشنهاد کردند. البته تحقیقات اخیر نیز نشان داده است که سطح لغزش واقعی به‌صورت یک منحنی ریاضی به نام **اسپیرال لگاریتمی** است که در حالت رس صرفاً چسبنده ($\phi = 0$) بر سطح لغزش دایره‌ای منطبق می‌گردد.

ما در این قسمت از فصلِ پایداری شیروانی‌ها، می‌خواهیم پایداری شیروانی‌های خاکی محدود را براساس سطح لغزش صفحه‌ای و استوانه‌ای بررسی کنیم.

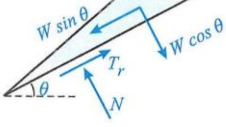
B-۱- تعیین ضریب اطمینان شیروانی محدود با سطح لغزش صفحه‌ای

برای شروع بحث، یک شیروانی خاکی محدود با سطح لغزش صفحه‌ای در راستای AB (که در حالت دو بعدی، خطی است) را در نظر بگیرید:



در اینجا مسئله ما، بررسی لغزش خاکِ قرار گرفته در بالای سطح AB (خط‌چین) می‌باشد که به آن گوهٔ لغزش می‌گوییم. (قسمت پر رنگ شکل)

برای رسیدن به این هدف کافیست گوهٔ لغزش را مثل جسمی تصور کنیم که بر روی یک سطح شیبدار، که با افق زاویه θ می‌سازد، قرار گرفته است. با ترسیم نیروهای وارد بر گوهٔ لغزش و رسم دیاگرام جسم آزاد آن، ضریب اطمینان در برابر لغزش را با طی گام‌های اساسی زیر تعیین می‌کنیم:



زیر شاخه‌های قسمت دوم

- **B-۱-** تعیین ضریب اطمینان شیروانی محدود با سطح لغزش صفحه‌ای
- **B-۲-** تعیین ضریب اطمینان شیروانی محدود با سطح لغزش استوانه‌ای

گام ۱ (تعیین نیروی سبب لغزش و تنش برشی ناشی از آن):

$$\text{نیروی سبب لغزش} = W\sin\theta \Rightarrow \tau = \frac{W\sin\theta}{A}$$

گام ۲ (تعیین σ و حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش):

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow N = W\cos\theta \Rightarrow \sigma = \frac{N}{A} = \frac{W\cos\theta}{A}$$

$$\text{حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش} = \sigma\tan\phi + c = \left(\frac{W\cos\theta}{A}\right)\tan\phi + c$$

گام ۳ (تعیین ضریب اطمینان در برابر لغزش):

$$FS = \frac{\text{حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{تنش برشی سبب لغزش}} \Rightarrow FS = \frac{\left(\frac{W\cos\theta}{A}\right)\tan\phi + c}{\left(\frac{W\sin\theta}{A}\right)}$$

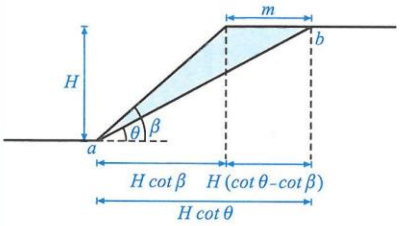
همانطور که مشاهده می‌کنید، به‌دست آوردن FS ظاهراً ساده است، اما مشکل آن است که شاید در نگاه اول شیوهٔ محاسبهٔ W و A را در رابطهٔ فوق ندانیم. در ادامه با بررسی چند سؤال، با اجزای رابطهٔ فوق بیشتر آشنا می‌شویم و حالت‌های خاص در محاسبهٔ ضریب اطمینان را نیز یاد می‌گیریم:

بررسی چند سوال

سؤال ۱: نیروی وزن در رابطهٔ ضریب اطمینان چگونه محاسبه می‌شود؟

پاسخ: اولاً بهتر است تا مانند شیروانی‌های نامحدود، اینجا نیز نیروی وزن را برای بعد عمود بر صفحهٔ واحد محاسبه کنیم. ثانیاً برای درک بهتر و سادگی محاسبات، شکل گوهٔ لغزش را با ابعاد آن، ترسیم می‌کنیم.

ما در ادامه معمولاً با دو نوع اطلاعات در صورت سؤالات مواجه هستیم:



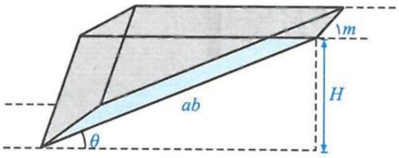
الف) اگر مقدار m در صورت سؤال داده شده باشد، در این حالت کار ساده است و می‌توانیم به‌صورت زیر مقدار وزن را بیابیم:

$$W = \gamma \times V = \gamma \times \left(\underbrace{\frac{1}{2} m \times H}_{A} \times 1\right) = \frac{1}{2}\gamma m H$$

ب) اگر مقدار m در صورت سؤال داده نشده باشد و در عوض زاویه شیب (β) و زاویه سطح لغزش (θ) را به ما بدهند، در این حالت با کمک شکل و روابط مثلثاتی مقدار m را می‌یابیم و سپس در رابطهٔ قسمت (الف) جایگذاری می‌کنیم:

$$m = H(\cot\theta - \cot\beta) \Rightarrow W = \frac{1}{2}\gamma H^2(\cot\theta - \cot\beta)$$

سؤال ۲: مساحت A در رابطهٔ ضریب اطمینان چقدر است؟



پاسخ: از آنجائی‌که بعد عمود بر صفحه برابر واحد فرض شده است، بنابراین مساحت سطح لغزش (A) برابر طول آن خواهد بود:

$$A = ab \times 1 = ab \quad , \quad ab = \frac{H}{\sin\theta} \Rightarrow A = \frac{H}{\sin\theta}$$

سؤال ۳: رابطهٔ محاسبهٔ ضریب اطمینان در خاک‌های دانه‌ای به‌چه صورت است؟

پاسخ:

$$\text{خاک دانه‌ای} \Rightarrow c = 0 \Rightarrow FS = \frac{\left(\frac{W\cos\theta}{A}\right)\tan\phi + 0}{\left(\frac{W\sin\theta}{A}\right)} \Rightarrow FS = \frac{\tan\phi}{\tan\theta}$$

آیا به نظر شما این موضوع جالب نیست!

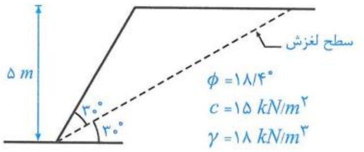
سؤال ۴: رابطهٔ محاسبهٔ ضریب اطمینان در خاک‌های رسی صرفاً چسبنده چگونه است؟

پاسخ:

خاک رس صرفاً چسبنده $\Rightarrow \phi=0\ ,\ c=c_u \Rightarrow FS=\dfrac{0+c_u}{(\dfrac{W\sin\theta}{A})} \Rightarrow \boxed{FS=\dfrac{c_u}{(\dfrac{W\sin\theta}{A})}}$

در ادامه با حل چند تمرین، بر روی مطالب گفته شده مسلط می‌شویم.

تمرین ۱۰: در شکل مقابل، ضریب اطمینان شیروانی را برای سطح لغزش نشان داده شده محاسبه کنید. $(\tan 18/4^\circ=\frac{1}{3})$



حل: با توجه به مطالبی که در این قسمت یاد گرفتیم، داریم:

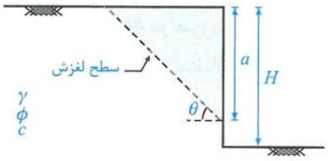
$$\begin{cases} FS=\dfrac{(\dfrac{W\cos\theta}{A})\tan\phi+c}{(\dfrac{W\sin\theta}{A})} \\ W=\dfrac{1}{2}\gamma H^2(\cot\theta-\cot\beta)=\dfrac{1}{2}\times 18\times 5^2\times(\cot 30^\circ-\cot 60^\circ)=150\sqrt{3}\,kN/m \\ A=\dfrac{H}{\sin\theta}=\dfrac{5}{\sin 30^\circ}=10\,m^2/m \end{cases}$$

$$\Rightarrow FS=\frac{(\dfrac{150\sqrt{3}\times\cos 30^\circ}{10})\tan 18/4+15}{(\dfrac{150\sqrt{3}\times\sin 30^\circ}{10})}=\frac{22/5\times\dfrac{1}{3}+15}{(\dfrac{15\sqrt{3}}{2})}=\sqrt{3}$$

تمرین ۱۱: برای شیروانی قائم نشان داده شده در شکل مقابل، مطلوب است تعیین:

الف) ضریب اطمینان برای سطح لغزشی که با افق زاویه θ می‌سازد.

ب) ضریب اطمینان برای سطح لغزشی که گوه لغزش ایجاد شده توسط آن یک مثلث متساوی‌الساقین باشد. (سراسری - ۸۹)



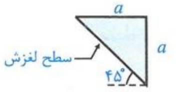
حل:

الف)

$$\begin{cases} FS=\dfrac{(\dfrac{W\cos\theta}{A})\tan\phi+c}{(\dfrac{W\sin\theta}{A})}=\dfrac{\tan\phi}{\tan\theta}+\dfrac{cA}{W\sin\theta} \\ W=\dfrac{1}{2}\gamma a^2(\cot\theta-\underbrace{\cot\beta}_{\text{صفر}})=\dfrac{1}{2}\gamma a^2\cot\theta \quad (\beta=90^\circ) \\ A=\dfrac{a}{\sin\theta} \end{cases}$$

$$\Rightarrow FS=\frac{\tan\phi}{\tan\theta}+\frac{c\times\dfrac{a}{\sin\theta}}{\dfrac{1}{2}\gamma a^2\cot\theta\times\sin\theta}=\frac{\tan\phi}{\tan\theta}+\frac{2c}{\gamma a\sin\theta\cos\theta}=\frac{\tan\phi}{\tan\theta}+\frac{4c}{\gamma a\sin 2\theta}$$

ب) اگر گوهٔ لغزش یک مثلث متساوی‌الساقین باشد، در آن‌صورت $\theta = ۴۵^\circ$ خواهد بود و گوهٔ لغزش به‌صورت مقابل بوده و FS به‌سادگی قابل محاسبه است:

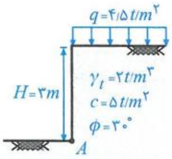


$$\Rightarrow \begin{cases} W = \gamma(\frac{۱}{۲}a \times a \times ۱) = \frac{۱}{۲}\gamma a^۲ \\ A = \sqrt{۲}\,a \times ۱ = a\sqrt{۲} \end{cases}$$

$$FS = \frac{(\frac{W\cos\theta}{A})\tan\phi + c}{(\frac{W\sin\theta}{A})} = \frac{\tan\phi}{\tan\theta} + \frac{cA}{W\sin\theta} \Rightarrow FS = \frac{\tan\phi}{\tan ۴۵^\circ} + \frac{c \times a\sqrt{۲}}{\frac{۱}{۲}\gamma a^۲ \times \sin ۴۵^\circ} = \tan\phi + \frac{۴c}{\gamma a}$$

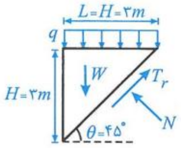
همانطور که مشاهده می‌کنید قسمت (ب) که مربوط به کنکور سراسری ۸۹ است عملاً حالت خاص قسمت (الف) می‌باشد که به ازای $\theta = ۴۵^\circ$ مطرح شده است.

تمرین ۱۴: یک شیروانی خاکی قائم با مشخصات نشان داده شده در شکل موردنظر است. در صورتی‌که سربار وارد بر بالای شیروانی برابر $q = ۴/۵\, t/m^۲$ باشد، ضریب اطمینان برای سطح لغزش خطی فرضی که با زاویه °۴۵ از نقطهٔ A شروع می‌شود، به چه میزان است؟ (سراسری - ۹۰)



۱) $۲ + \sqrt{۳}$
۲) $۴ + \sqrt{۳}$
۳) $\frac{۲ + \sqrt{۳}}{۳}$
۴) $\frac{۴ + \sqrt{۳}}{۳}$

● حل: در این تست علاوه بر نیروی وزن گوه، نیروی ناشی از سربار q را هم داریم که بایستی با نیروی وزن گوه جمع شود. در این حالت برای محاسبه ضریب اطمینان، با نیروهای زیر و با در نظر گرفتن مقدار واحد برای بعد عمود بر صفحه، محاسبات را انجام می‌دهیم:



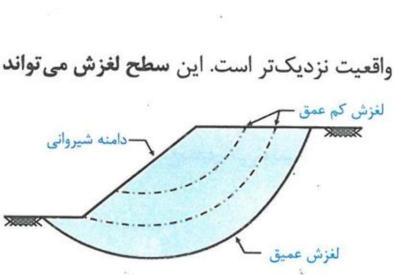
$$\begin{cases} T_r \text{ نیروی سبب لغزش که با } T_r \text{ برابر است} = (W + qH)\sin\theta \\ N \text{ نیروی عکس‌العمل قائم } = (W + qH)\cos\theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} FS = \frac{\text{حداکثر تنش برشی مقاوم در برابر لغزش}}{\text{تنش برشی سبب لغزش}} = \frac{\frac{(W + qH)\cos\theta}{A} \times \tan\phi + c}{\frac{(W + qH)\sin\theta}{A}} = \frac{\tan\phi}{\tan\theta} + \frac{cA}{(W + qH)\sin\theta} \\ \underbrace{W}_{\to \gamma V} + qH = (۲)(\frac{۱}{۲} \times ۳ \times ۳ \times ۱) + ۴/۵ \times ۳ = ۲۲/۵\ t/m \\ \theta = ۴۵^\circ \Rightarrow \cos\theta = \sin\theta = \frac{\sqrt{۲}}{۲} \quad , \quad A = \frac{H}{\sin\theta} = \frac{۳}{\sin ۴۵^\circ} = ۳\sqrt{۲}\ m^۲/m \\ \phi = ۳۰^\circ \quad , \quad c = ۵\ t/m^۲ \end{cases}$$

$$\Rightarrow FS = \frac{\tan ۳۰^\circ}{\tan ۴۵^\circ} + \frac{۵ \times ۳\sqrt{۲}}{۲۲/۵ \times \sin ۴۵^\circ} = \frac{\sqrt{۳}}{۳} + \frac{۴}{۳} = \frac{۴ + \sqrt{۳}}{۳}$$

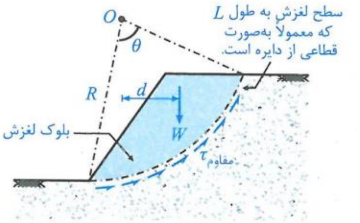
B-۲- تعیین ضریب اطمینان شیروانی محدود با سطح لغزش استوانه‌ای

همانطور که قبلاً گفتیم در یک شیروانی خاکی محدود، سطح لغزش استوانه‌ای (دایره‌ای) به واقعیت نزدیک‌تر است. این **سطح لغزش می‌تواند کم عمق یا عمیق باشد** که این موضوع در شکل مقابل نشان داده شده است:



همانطور که ملاحظه می‌کنید در **لغزش کم عمق** (اسم‌های دیگر: لغزش دامنه و لغزش سطحی) سطح لغزش عمیـق نبـوده و شـیروانی را در پای شیب یا بالای آن قطع می‌کند، این در حالی است که در **لغزش عمیق**، سطح لغزش عمیق بوده و دامنه شیروانی را قطع نمی‌کند.

در تحلیل پایداری شیروانی محدود با سطح لغزش دایره‌ای، بایستی ضریب اطمینان برای تمام سطوح لغزش کم عمق و عمیق تعیین گردد و از میان آنها سطحی که کمترین ضریب اطمینان را داشته باشد، به‌عنوان سطح لغزش بحرانی شناخته شده و ضریب اطمینان مربوط بـه آن، ضریب اطمینان شیروانی خواهد بود.



در تحلیل یک شیروانی با فرض سطح لغزش دایره‌ای، دوران تـودهٔ خـاک در ناحیـهٔ لغـزش (حول یک نقطه که همان مرکز دایرهٔ لغزش است) مطرح می‌شود و بررسی لغـزش دورانـی تودهٔ خاک، مورد نظر قرار می‌گیرد. شکل مقابل یک شیروانی محدود با سطح لغزش دایره‌ای (که در سه بعدی استوانه‌ای است) را نشان می‌دهد که در آن وضعیت نیروهـا و تـنش‌هـای وارد بر **بلوک لغزش** (قسمت پر رنگ شکل) مشخص شده است.

در ادامه با بررسی چند سؤال، ضریب اطمینان پایداری شیروانی در این حالت را می‌یابیم:

بررسی چند سوال

سوال ۱: مقدار نیروی وزن بلوک لغزش را چگونه باید محاسبه کرد؟

● پاسخ: در اینجا نیز مانند سایر قسمت‌های این فصل، بعد عمود بر صفحه را برابر واحد در نظر گرفته و نیروی وزن بلوک لغزش را با ایـن فرض به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

وزن مخصوص خاک × مساحت بلوک لغزش = نیروی وزن در بعد عمود بر صفحهٔ واحد

سؤال ۲: مقدار لنگری که قصد دوران بلوک لغزش را دارد چقدر است؟

● پاسخ: لنگری که قصد دوران بلوک لغزش را دارد، **لنگر محرک** نامیده می‌شود و همان لنگر ناشی از نیروی وزن بلوک لغزش حول نقطهٔ O می‌باشد.

لنگر سبب دوران بلوک لغزش = $M_{محرک} = W \times d$

سؤال ۳: لنگر مقاوم در برابر دوران بلوک لغزش چگونه محاسبه می‌شود و مقدار ماکزیمم آن چقدر است؟

● پاسخ: اگر شرایط به‌گونه‌ای باشد که بتوان تنش‌های برشی مقاوم در سطح لغزش را با هم برابر دانست (مقـدار $\tau_{مقاوم}$ در نقـاط مختلـف یکسان باشد)، در آن‌صورت **لنگر مقاومی** که جلوی دوران بلوک لغزش را می‌گیرد، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$M_{مقاوم} = (\tau_{مقاوم} \times L) \times (R) = \tau_{مقاوم} RL$$

(R: بازوی لنگر مقاوم)

حال اگر مقدار ماکزیمم این لنگر مدنظر باشد، کافی است تا در رابطهٔ بالا، $\tau_f = \tau_{مقاوم}$ قرار داده شود که در این‌صورت خواهیم داشت:

حداکثر لنگر مقاوم در برابر دوران بلوک لغزش = حداکثر $M_{مقاوم} = \tau_f RL$

سؤال ۳: ضریب اطمینان پایداری شیروانی در این حالت چگونه محاسبه می‌شود؟

● پاسخ: در این حالت با توجه به اینکه بحث دوران بلوک لغزش مطرح است، بایستی ضریب اطمینان در برابر لغزش دورانـی را بـه‌صـورت زیر محاسبه کنیم:

$$FS = \frac{\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر دوران بلوک لغزش}}{\text{لنگر سبب دوران بلوک لغزش}} = \frac{\tau_f RL}{Wd}$$

اکنون در تکمیل مطالب فوق، به نکات زیر توجه کنید:

۱) طول قوس L با توجه به زاویهٔ مرکزی مقابل آن به‌سادگی محاسبه می‌شود که براساس آن رابطهٔ ضریب اطمینان به‌صورت زیر خواهد بود:

$$FS = \frac{\tau_f \times R \times R\theta}{Wd} = \frac{\tau_f R^2 \theta}{Wd}$$

پس در یک جمع‌بندی می‌نویسیم:

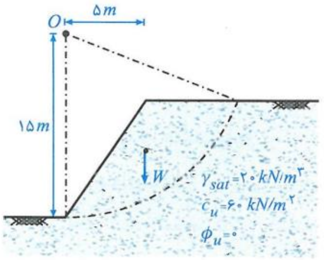
$$FS = \frac{\tau_f RL}{Wd} = \frac{\tau_f R^2 \theta}{Wd}$$

۲) زاویه θ در رابطهٔ بالا حتماً بایستی بر حسب رادیان به‌کار رود، مثلاً اگر زاویه $\theta = ۶۰^\circ$ بود، بایستی θ به‌صورت زیر لحاظ شود:

$$\theta = ۶۰ \times \frac{\pi}{۱۸۰} = \frac{\pi}{۳} = \frac{۳/۱۴}{۳} \simeq ۳/۰۵\ rad$$

۳) در محاسبات ضریب اطمینان و به‌دست آوردن روابط فوق فرض کردیم که مقاومت برشی خاک در تمام سطح لغزش ثابت بماند. این شرایط وقتی پیش می‌آید که خاک رس صرفاً چسبنده داشته باشیم که در آن $\tau_f = c_u$ است. $\tau_f = \sigma \tan\phi + c = c_u$ ($c \rightarrow c_u$)

در این حالت کل تودهٔ خاک قرار گرفته در بالای سطح لغزش (بلوک لغزش) را به‌صورت یکپارچه در نظر گرفتیم و ضریب اطمینان به‌دست آمد. این روشِ محاسبهٔ ضریب اطمینان، **روش توده** نام دارد. حال اگر τ_f ثابت نباشد (خاکی غیر از رس صرفاً چسبنده داشته باشیم) در آن‌صورت از روشی به نام **روش قطعه** استفاده می‌شود که در قسمت تکمیلی به آن می‌پردازیم.



تمرین ۱۳: ضریب اطمینان در پایداری کوتاه‌مدت گودبرداری انجام شده در یک لایه خاک رس اشباع با مشخصات شکل روبرو چقدر است؟ طول دایرهٔ لغزش ۲۰ متر و مساحت بلوک لغزشی برابر ۱۰۰ $m^۲$ می‌باشد. (سراسری - ۸۵)

۱) ۰/۵۵
۲) ۱/۱۵
۳) ۱/۸
۴) ۲/۱

● **حل:** قبل از محاسبهٔ ضریب اطمینان در این شیروانی، توجه می‌کنیم که:

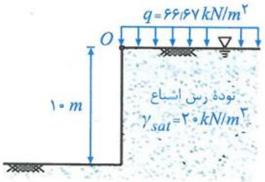
اولاً: چون پایداری کوتاه مدت گودبرداری مطرح بوده و در صورت سؤال نیز c_u داده شده است، بنابراین حالت خاک رس صرفاً چسبنده برقرار است و $\tau_f = c_u$ می‌باشد.

ثانیاً: در صورت سؤال طول دایره لغزش (L) داده شده است، بنابراین برای محاسبهٔ FS از رابطه‌ای استفاده می‌کنیم که بر مبنای L است.

حال به محاسبهٔ FS می‌پردازیم:

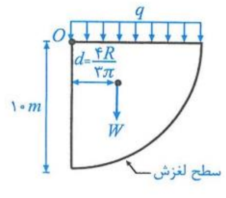
$$\begin{cases} FS = \dfrac{\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر دوران بلوک لغزش}}{\text{لنگر سبب دوران بلوک لغزش}} = \dfrac{\tau_f RL}{Wd} = \dfrac{c_u RL}{Wd} \\ W = \text{مساحت بلوک لغزش} \times \text{وزن مخصوص خاک} = ۱۰۰ \times ۲۰ = ۲۰۰۰\ kN/m \\ c_u = ۶۰\ kN/m^۲ ,\ d = ۵\ m ,\ R = ۱۵\ m ,\ L = ۲۰\ m \end{cases} \Rightarrow FS = \frac{۶۰ \times ۱۵ \times ۲۰}{۲۰۰۰ \times ۵} = ۱/۸$$

بنابراین گزینه (۳) صحیح است.



تمرین ۱۴: شیروانی قائم شکل مقابل از جنس خاک رس با مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ ۱۰۰ $kN/m^۲$ است. اگر سطح لغزش قسمتی از یک دایره به شعاع ۱۰ متر و مرکز O باشد، در آنصورت ضریب اطمینان پایداری کوتاه‌مدت این شیروانی در برابر لغزش چقدر است؟

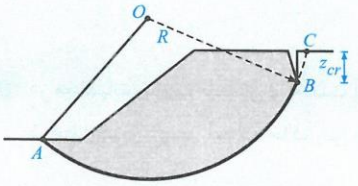
● **حل:** در این سؤال علاوه بر وزن تودهٔ خاک، سربار q نیز در ایجاد لنگر محرک برای دوران و لغزش، وارد کار می‌شود. در ادامه با ترسیم سطح لغزش شیروانی مطابق شکل زیر، خواهیم داشت:



$$FS = \frac{\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر دوران بلوک لغزش}}{\text{لنگر سبب دوران بلوک لغزش}} = \frac{\tau_f R^۲\theta}{Wd + qR \times \frac{R}{۲}}$$

$$\xrightarrow{\tau_f = c_u} FS = \frac{c_u R^۲\theta}{W \times \frac{۴R}{۳\pi} + \frac{۱}{۲} qR^۲} = \frac{۱۰۰ \times ۱۰^۲ \times \frac{\pi}{۲}}{(\frac{۱}{۴}\pi \times ۱۰^۲ \times ۲۰)(\frac{۴ \times ۱۰}{۳\pi}) + \frac{۱}{۲} \times \underbrace{۶۶/۶۷}_{\frac{۲۰۰}{۳}} \times ۱۰^۲} = \frac{\pi}{۲} = ۱/۵۷$$

بررسی یک موضوع مهم



در برخی مواقع ممکن است خاک شیروانی در قسمت بالای شیب ترک بخورد. این **ترک‌های کششی** در شیروانی‌هایی از جنس خاک رس به‌وجود می‌آیند و در حالتی‌که خاک رس، صرفاً چسبنده باشد (شرایط $\phi = 0$)، می‌توان عمق ترک کششی را از روابط زیر محاسبه کرد (این روابط را در فصل اول مهندسی پی به‌دست می‌آوریم):

الف) حالتی که در ترک آبی وجود ندارد و خالی است:

$$z_{cr} = \frac{2c_u}{\gamma_{sat}}$$

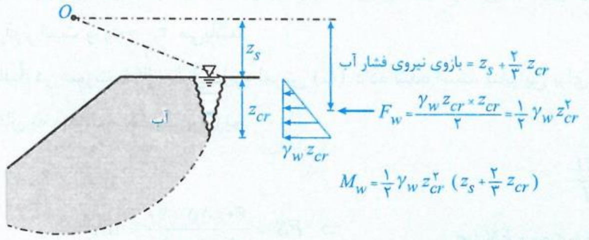
ب) حالتی که ترک پر از آب شده است:

$$z_{cr} = \frac{2c_u}{\gamma'}$$

حال ممکن است این سؤال در ذهن شما به‌وجود بیاید که این ترک کششی چه تأثیری بر پایداری شیروانی خاکی می‌گذارد؟ در جواب باید بگوییم که به هنگام وقوع ترک کششی دو اتفاق مهم رخ می‌دهد:

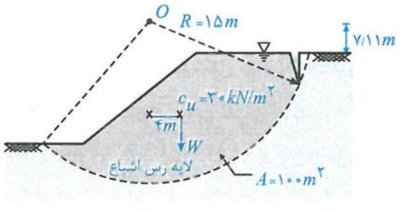
۱) ترک، سطح لغزش شیروانی را تغییر می‌دهد و باعث می‌شود تا سطح لغزش به‌جای اینکه سطح زمین را قطع کند، در پای ترک متوقف شود (سطح لغزش جدید، سطح AB خواهد بود.)

۲) ترک اگر از آب پر شود، باعث ایجاد یک فشار هیدرواستاتیکی در طول خود می‌گردد. این فشار هیدرواستاتیکی باعث می‌شود تا لنگری به اندازهٔ M_w به لنگر سبب دوران بلوک لغزش افزوده شده و ضریب اطمینان را کم کند. مقدار این لنگر اضافی M_w، به‌صورت زیر قابل محاسبه است:



توجه شود که در مسائل کنکور برای ساده‌تر شدن سؤال، معمولاً عمق ترک را می‌دهند.

تمرین ۱۵: در یک لایه رس اشباع با وزن مخصوص $20\,kN/m^3$، مطابق شکل مقابل گودبرداری انجام شده است. اگر طول قوس دایرهٔ لغزش برابر $30\,m$ و مساحت بلوک لغزش $100\,m^2$ باشد، ضریب اطمینان پایداری کوتاه‌مدت این شیب چقدر است؟ (ترک کششی پر از آب و با عمق $6\,m$ است، $\gamma_w = 10\,kN/m^3$ است.)



حل: با توجه به بحثی که انجام دادیم، می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} FS = \dfrac{\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر دوران بلوک لغزش}}{\text{لنگر سبب دوران لغزش}} = \dfrac{\tau_f RL}{\underset{\to \gamma_{sat} V}{W}\, d + M_w} \\ \tau_f = c_u = 30\,kN/m^2 \ \text{(پایداری کوتاه‌مدت)} \\ M_w = F_w \times \text{بازو} = \left(\frac{1}{2}\gamma_w z_{cr}^2\right) \times \left(z_s + \frac{2}{3} z_{cr}\right) \end{cases}$$

$$\text{محاسبهٔ ضریب اطمینان} \Rightarrow FS = \frac{30 \times 15 \times 30}{(20 \times 100)(4) + \left(\frac{1}{2} \times 10 \times 6^2\right)\left(7/11 + \frac{2}{3} \times 6\right)} = \frac{13500}{8000 + 2000} = 1/35$$

C-۱- تعیین سطح لغزش بحرانی در شیروانی‌های محدود به روش کولمان

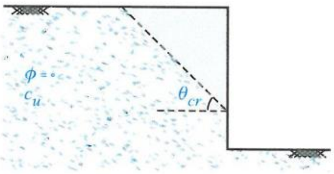
همانطور که در ابتدای قسمت دوم این فصل اشاره کردیم، کولمان سطح لغزش در شیروانی‌های محدود را به‌صورت صفحه‌ای فرض کرده و بر این اساس لغزش گوهٔ بالای این سطح را مورد توجه قرار داد.

ما تاکنون سطح لغزش احتمالی را در اختیار داشتیم و برای آن، ضریب اطمینان پایداری شیروانی را تعیین می‌کردیم. اما اکنون این سؤال مطرح می‌شود که سطح لغزش بحرانی کدام سطح است، به‌عبارت دیگر مقدار θ_{cr} چگونه به‌دست می‌آید؟

برای پاسخ به این سؤال ابتدا باید بگوییم که θ_{cr} زاویه‌ای است که به ازای آن، سطح لغزش مورد نظر کمترین ضریب اطمینان را خواهد داشت. پس برای یافتن θ_{cr} بایستی از رابطهٔ ضریب اطمینان نسبت به θ مشتق گرفته و آن را مساوی صفر قرار دهیم که حاصل آن برای θ به‌صورت زیر است:

$$\theta_{cr} = \frac{\beta + \phi}{۲}$$

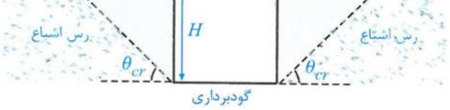
به عنوان مثال برای یک شیروانی خاکی قائم که از خاک رس ایجاد شده است، سطح لغزش بحرانی در کوتاه مدت (شرایط $\phi = ۰$) برابر است با:



$$\theta_{cr} = \frac{۹۰ + ۰}{۲} = ۴۵^\circ$$

تمرین ۱۶: یک لایه رس اشباع تحت شرایط زهکشی نشده و به‌صورت قائم گودبرداری می‌شود. اگر مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ این لایه برابر $۳۰\ kN/m^۲$ و وزن مخصوص آن برابر $۱۸\ kN/m^۳$ باشد، در آنصورت در یک طرح کوتاه‌مدت، عمقی را محاسبه کنید که در برابر ریزش، ضریب اطمینانی برابر ۲ داشته باشد.

● حل: برای خاک رس اشباع در شرایط زهکشی نشده، $\phi = ۰$ و $c = c_u$ است یعنی خاک رس مورد نظر ما صرفاً چسبنده است. با گودبرداری قائم و در نظر گرفتن سطح لغزش بحرانی (θ_{cr})، شکل این سؤال به‌صورت زیر خواهد بود:



$$\beta = ۹۰^\circ$$
$$\theta_{cr} = \frac{\beta + \phi}{۲} = \frac{۹۰ + ۰}{۲} = ۴۵^\circ$$

حال با توجه به فرمول محاسبهٔ ضریب اطمینان در این شرایط (پاسخ سؤال ۴ از بخش $B-۱$)، می‌نویسیم:

$$\begin{cases} FS = \dfrac{c_u}{\left(\dfrac{W \sin\theta}{A}\right)} = \dfrac{c_u A}{W \sin\theta} \\ \theta = \theta_{cr} = ۴۵^\circ \Rightarrow W = \dfrac{۱}{۲}\gamma H^۲ \,,\; A = \dfrac{H}{\sin ۴۵^\circ} = H\sqrt{۲} \end{cases}$$

$$\Rightarrow FS = \frac{c_u \times H\sqrt{۲}}{\frac{۱}{۲}\gamma H^۲ \times \sin ۴۵^\circ} = \frac{۴c_u}{\gamma H} \Rightarrow H = \frac{۴c_u}{\gamma FS} = \frac{۴ \times ۳۰}{۱۸ \times ۲} = ۳/۳۳\ m$$

قسمت سوم (مباحث تکمیلی پایداری شیروانی‌های خاکی)

زیر شاخه‌های قسمت سوم

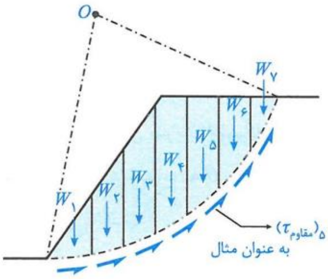
C-۱- تعیین سطح لغزش بحرانی در شیروانی‌های محدود به روش کولمان

C-۲- روش قطعات در بحث پایداری شیروانی‌های محدود با سطح لغزش استوانه‌ای

C-۲- روش قطعات در بحث پایداری شیروانی‌های محدود با سطح لغزش استوانه‌ای

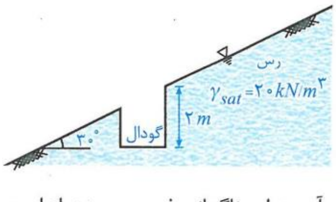
همانطور که قبلاً گفتیم، در شیروانی‌های محدود با سطح لغزش استوانه‌ای، فرض ما بر این بود که τ_f بر روی سطح لغزش ثابت است (خاک رس صرفاً چسبنده) که بر مبنای این فرض از **روش توده** در محاسبهٔ FS استفاده کردیم.

حال اگر τ_f در سطح لغزش تغییر کند، بایستی تودهٔ خاکِ قرار گرفته در بالای سطح لغزش را به قطعات قائم متعددی تقسیم کنیم، به‌طوری‌که در هر قطعه τ ثابت باشد. با تعیین لنگرهای مقاوم و محرک برای هر قطعه، در نهایت ضریب اطمینان شیروانی از حاصل تقسیم مجموع لنگرهای مقاوم به محرک این قطعات قابل محاسبه است. این روش، **روش قطعات** نام دارد که به علت طولانی بودن و تشریحی بودن مسائل آن، از پرداختن به آن صرف‌نظر کرده‌ایم.

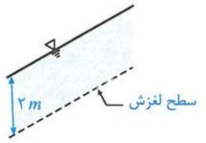


افزایش مهارت و تسلط بیشتر

تمرین ۱۷: یک گودال (ترانشه) جهت قرارگرفتن دکل‌های مخابراتی، مطابق شکل زیر در یک شیب خاکی از جنس رس حفر می‌شود. زمانی‌که عمق گودال حفر شده به ۲ متر می‌رسد، ناگهان خاک رس در قسمت فوقانی آن فروریخته و ضمن مجروح شدن کارگران، گودال نیز پر می‌شود. بررسی‌های بعدیِ این گسیختگی نشان می‌دهد که سطح لغزش تقریباً به موازات شیب اصلی بوده است. مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک رس چقدر است؟



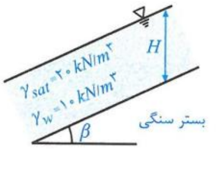
حل: بلافاصله بعد از حفر گودال، شیب خاکی بالای آن به‌طور ناگهانی فرو می‌ریزد. از این‌رو لازم است تا پایداری کوتاه‌مدت شیب مدنظر قرارگرفته شود. باتوجه به اطلاعات داده شده درمورد سطح لغزش، می‌توان با نامحدود درنظر گرفتن این شیروانی خاکی، نوشت:



$$FS=\frac{c_u}{\gamma_{sat}\,H\cos\beta\sin\beta}\xrightarrow[FS=۱]{\text{لغزش}}۱=\frac{c_u}{۲۰\times ۲\times\cos ۳۰^\circ\times\sin ۳۰^\circ}$$

$$\Rightarrow\ c_u=۱۰\sqrt{۳}=۱۷/۳\ kN/m^۲$$

تمرین ۱۸: در شیروانی خاکی شکل زیر، ضریب اطمینان لغزش ماسه برروی بستر سنگی برابر ۱/۴ می‌باشد. اگر زاویه اصطکاک خاک و بستر سنگی برابر $\delta=۳۵^\circ$ باشد، در آن‌صورت باتوجه به سایر اطلاعات داده شده در شکل، گرادیان هیدرولیکی جریان آب در شیروانی خاکی نشان داده شده، تقریباً کدام است؟ $(\tan ۳۵^\circ=۰/۷)$



۱) ۰/۲
۲) ۰/۲۵
۳) ۰/۳
۴) مقدار گرادیان هیدرولیکی بستگی به ارتفاع H دارد.

حل: ما در فصل حرکت آب در خاک دیدیم که در شیب‌های خاکی، گرادیان هیدرولیکی برابر سینوس زاویه شیب نسبت به افق است، پس در این سؤال می‌توان گفت که $i=\sin\beta$ است. اما برای یافتن $i=\sin\beta$، با استفاده از مطالبی که در این فصل یاد گرفتیم، می‌توان نوشت:

$$\text{شیروانی ماسه‌ای اشباع}\ \Rightarrow\ c'=۰\ \Rightarrow\ FS=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\delta}{\tan\beta}\right)$$

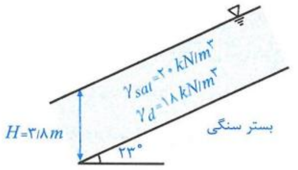
$$\Rightarrow\ ۱/۴=\left(\frac{۲۰-۱۰}{۲۰}\right)\left(\frac{\tan ۳۵^\circ}{\tan\beta}\right)\ \Rightarrow\ ۱/۴=\left(\frac{۱}{۲}\right)\left(\frac{۰/۷}{\tan\beta}\right)\ \Rightarrow\ \tan\beta=\frac{۱}{۴}=۰/۲۵$$

پس در مورد $i=\sin\beta$ می‌توان گفت:

$$\sin\beta=\frac{۱}{\sqrt{۴^۲+۱^۲}}=\frac{۱}{\sqrt{۱۷}}\simeq\frac{۱}{\sqrt{۱۶}}\simeq ۰/۲۵$$

پس گزینه (۲) درست است.

تمرین ۱۹: یک لایه خاک ماسه‌ای مطابق شکل زیر بر روی بستر سنگی با شیب °۲۳ قرار گرفته است. زاویه اصطکاک بین خاک و بستر سنگی برابر °۳۵ می‌باشد. اگر بخواهیم ضریب اطمینان پایداری شیروانی در برابر لغزش را با خشک کردن خاک ۱/۵ برابر کنیم، باید تا چه عمقی از سطح زمین ارتفاع آب را کاهش دهیم؟ ($tan\,۲۳^\circ = ۰/۴۲$, $tan\,۳۵^\circ = ۰/۷$, $\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$)

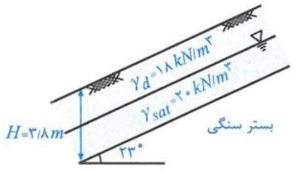


۱) ۲ متری
۲) ۱/۵ متری
۳) ۱/۸ متری
۴) ۲/۵ متری

● **حل:** ابتدا ضریب اطمینان شیروانی در وضعیت موجود را محاسبه می‌کنیم:

$$\text{خاک ماسه‌ای اشباع} \Rightarrow c' = ۰ \Rightarrow FS = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{tan\,\delta}{tan\,\beta}\right) = \left(\frac{۲۰-۱۰}{۲۰}\right)\times\left(\frac{tan\,۳۵^\circ}{tan\,۲۳^\circ}\right) = \frac{۱}{۲}\left(\frac{tan\,۳۵^\circ}{tan\,۲۳^\circ}\right)$$

حال وضعیتی را نشان می‌دهیم که سطح آب به اندازهٔ ΔH پایین آمده است. این ΔH فعلاً مجهول است و قرار است ما آن را طوری تعیین کنیم که ضریب اطمینان در این حالت ۱/۵ برابر حالت اول شود.



در این شرایط برای تعیین FS ابتدا لازم است تا مقادیر σ' و τ جدید را بیابیم:

$$\sigma' = \left[\gamma_d\,\Delta H + \gamma'(۳/۸-\Delta H)\right]cos^۲\beta = \left[۱۸\times\Delta H + ۱۰\times(۳/۸-\Delta H)\right]cos^۲ ۲۳^\circ = (۸\,\Delta H + ۳۸)\times cos^۲ ۲۳^\circ$$

$$\tau = \left[\gamma_d\,\Delta H + \gamma_{sat}(۳/۸-\Delta H)\right]sin\beta\,cos\beta = \left[۱۸\times\Delta H + ۲۰\times(۳/۸-\Delta H)\right]sin\,۲۳^\circ\,cos\,۲۳^\circ = (۷۶-۲\,\Delta H)\,sin\,۲۳^\circ\,cos\,۲۳^\circ$$

و در ادامه مقدار FS در این حالت برابر می‌شود با:

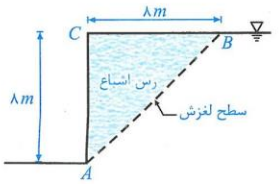
$$FS_۲ = \frac{\sigma' tan\delta + c'}{\tau} = \frac{(۸\,\Delta H + ۳۸)\,cos^۲ ۲۳^\circ \times tan\,۳۵^\circ + ۰}{(۷۶-۲\,\Delta H)\,sin\,۲۳^\circ\,cos\,۲۳^\circ} = \left(\frac{tan\,۳۵^\circ}{tan\,۲۳^\circ}\right)\left(\frac{۸\Delta H + ۳۸}{۷۶-۲\,\Delta H}\right)$$

برای یافتن ΔH نیز طبق صورت سؤال داریم:

$$FS_۲ = ۱/۵\,FS_۱ \Rightarrow \left(\frac{tan\,۳۵^\circ}{tan\,۲۳^\circ}\right)\left(\frac{۸\,\Delta H + ۳۸}{۷۶-۲\,\Delta H}\right) = ۱/۵\times\left[\frac{۱}{۲}\left(\frac{tan\,۳۵^\circ}{tan\,۲۳^\circ}\right)\right] \Rightarrow \frac{۸\,\Delta H + ۳۸}{۷۶-۲\,\Delta H} = \frac{۳}{۴} \Rightarrow \Delta H = ۲m$$

بنابراین گزینه (۱) پاسخ درست این تست است.

تمرین ۲۰: برای شیروانی قائم نشان داده شده در شکل زیر، سطح AB نشان دهندهٔ یک سطح لغزش آزمایشی است. ضریب اطمینان در برابر لغزش برای گوه ABC بعد از گذشت مدت زمانی طولانی چند برابر ضریب اطمینان در برابر لغزش در حین ساخت می‌شود؟



$c_u = ۵۰\,kN/m^۲$
$\phi_u = ۰$, $\phi' = ۳۰^\circ$
$c' = ۰$, $\gamma_w = ۱۰\,kN/m^۳$
$\gamma_{sat} = ۲۰\,kN/m^۳$, $\sqrt{۳} = ۱/۷$

۱) ۰/۸۶
۲) ۰/۴۵
۳) ۱
۴) ۰/۲۲۵

● **حل:** در حین ساخت (کوتاه مدت)، شیروانی تحکیم‌نیافته و زهکشی نشده است و احتمال لغزش ناگهانی آن وجود دارد، بنابراین با حاکمیت تنش کل و در نظر گرفتن شرایط $\phi = ۰$ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} FS_۱ = \dfrac{\tau_f}{\tau} \\ \tau_f = c_u \end{cases} \Rightarrow FS_۱ = \frac{c_u}{\left(\dfrac{W sin\theta}{A}\right)} = \frac{۵۰}{\left(\dfrac{۸\times۴\times۲۰ sin\,۴۵^\circ}{۸\sqrt{۲}}\right)} = ۱/۲۵$$

بعد از گذشت مدت‌زمان طولانی، شیروانی تحکیم‌یافته و زهکشی شده است و احتمال دارد دچار لغزش تدریجی شود، بنابراین بـا حاکمیـت تنش مؤثر می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} FS_۲ = \dfrac{\tau_f}{\tau} \\ \tau_f = \sigma' tan\phi' + c' \end{cases} \Rightarrow FS_۲ = \dfrac{(\dfrac{W'cos\theta}{A})\ tan\phi' + c'}{(\dfrac{Wsin\theta}{A})}$$

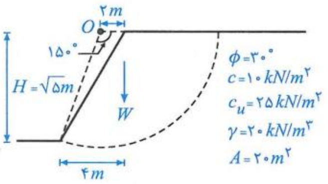
$$\xrightarrow{c'=۰} FS_۲ = \frac{W'}{W}\left(\frac{tan\,\phi'}{tan\,\theta}\right) = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{tan\,\phi'}{tan\,\theta}\right) = \left(\frac{۲۰-۱۰}{۲۰}\right)\left(\frac{tan\,۳۰^\circ}{tan\,۴۵^\circ}\right) = \frac{\sqrt{۳}}{۶}$$

و در نهایت با مقایسه این دو حالت، نسبت ضریب اطمینان‌ها به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

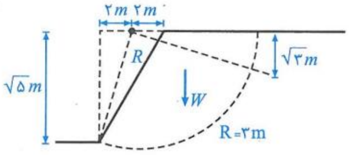
$$\frac{FS_۲}{FS_۱} = \frac{\dfrac{\sqrt{۳}}{۶}}{۱/۲۵} = \frac{۲\sqrt{۳}}{۱۵} \simeq ۰/۲۲۵$$

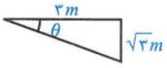
پس گزینهٔ (۴) صحیح است.

تمرین ۴۱: مطابق شکل روبرو، یک شیروانی با سطح لغزش دایروی مدنظر است. اگـر در محاسـبه ضـریب اطمینـان پایـداری شـیروانی عمـق ترک $\sqrt{۳}\,m$ باشد و ما از این ترک‌خوردگی خاک صرفنظر کنیم، در آن‌صورت ضریب اطمینان در حالت واقعی چند برابر حالتی است کـه ضـریب اطمینان بدون ترک محاسبه شده است؟ (پایداری کوتاه‌مدت مدنظر می‌باشد و $\pi = ۳$ است)



حل: ابتدا طولی از قوس لغزش را که ترک می‌خورد محاسبه می‌کنیم. در این حالت باتوجه به شکل می‌توان نوشت:





$$R = \sqrt{(\sqrt{۵})^۲ + ۲^۲} = ۳m \quad و \quad tan\,\theta = \frac{\sqrt{۳}}{۳} \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{۶}$$

$$\Rightarrow L_{crack} = R\theta = ۳ \times \frac{\pi}{۶} = ۱/۵m \quad و \quad \text{طول کل لغزش} \ L = R\theta = \frac{۵\pi}{۶} \times ۳ = ۷/۵m$$

حال ضریب اطمینان در دو حالت خواسته شده را می‌یابیم:

الف) ضریب اطمینان در حالت بدون ترک:

$$FS_۱ = \frac{\tau_f\, L_۱}{W \times d} = \frac{c_u\, L_۱}{W \times d} = \frac{۲۵ \times ۷/۵}{W \times d}$$

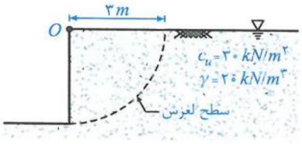
ب) ضریب اطمینان در حالت ترک‌دار (واقعی):

$$FS_۲ = \frac{\tau_f\, L_۲}{W \times d} = \frac{c_u\, L_۲}{W \times d} = \frac{۲۵ \times (۷/۵ - ۱/۵)}{W \times d} = \frac{۲۵ \times ۶}{W \times d}$$

و در نهایت نسبت $\dfrac{FS_۲}{FS_۱}$ برابر می شود با:

$$\frac{FS_۲}{FS_۱} = \frac{(\dfrac{۲۵ \times ۶}{W \times d})}{(\dfrac{۲۵ \times ۷/۵}{W \times d})} = \frac{۶}{۷/۵} = ۰/۸$$

تمرین ۴۲: یک شیروانی با سطح لغزش دایروی مانند شکل مدنظر می‌باشد. حداکثر شتاب افقی زلزله برای اینکه خاک بـه پـایین نلغـزد چقـدر می‌تواند باشد؟ ($\pi \approx ۳$)



۱) g

۲) $۰/۷۵g$

۳) $۱/۲۵g$

۴) $۰/۲۵g$

حل: برای اینکه خاک به پایین نلغزد لازم است که لنگرهای مقاوم بیشتر از لنگرهای محرک باشند. پس بیاییـد ابتـدا لنگرهـای محـرک و مقاوم را محاسبه کنیم.

الف) محاسبه لنگرهای محرک:

$$\begin{cases} M_d = (W)(\frac{۴R}{۳\pi}) + (F_{زلزله}) \times (\frac{۴R}{۳\pi}) \\ W = \gamma V = \gamma \times \frac{\pi R^۲}{۴} \times ۱ = ۲۰ \times \frac{\pi \times ۳^۲}{۴} = ۱۳۵\ kN/m \\ F_{زلزله} = ma = \frac{W}{g} \times a = ۱۳۵\frac{a}{g} \end{cases}$$

$$\Rightarrow M_d = ۱۳۵ \times (\frac{۴ \times ۳}{۳\pi}) + ۱۳۵\frac{a}{g}(\frac{۴ \times ۳}{۳\pi}) = ۱۸۰ + ۱۸۰(\frac{a}{g})$$

ب) محاسبه لنگر مقاوم:

$$\begin{cases} M_R = \tau_f LR \\ \tau_f = c_u \quad \text{(بارگذاری زلزله سریع است)} \\ L = R\theta \end{cases} \Rightarrow M_R = c_u R^۲ \theta = (۳۰)(۳^۲)(\frac{\pi}{۲}) = ۴۰۵\ kN/m$$

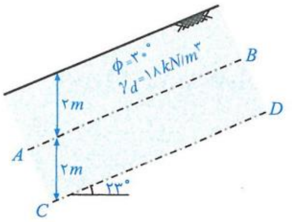
و در انتها با نوشتن شرایط پایداری شیروانی، خواهیم داشت:

شرط پایداری شیروانی: $M_R \geq M_d \Rightarrow ۴۰۵ \geq ۱۸۰ + ۱۸۰(\frac{a}{g}) \Rightarrow \frac{a}{g} \leq ۱/۲۵ \Rightarrow a_{max} = ۱/۲۵g$

پس گزینهٔ (۳) درست است.

تست‌های فصل نهم

۱- یک شیروانی خاکی با مشخصات داده شده در شکل مفروض است. اگر یک نمونهٔ بازسازی شده از مصالح این شیروانی، در آزمایش برش مستقیم تحت فشار افقی $1/73\ kg/cm^2$ و فشار قائم $3\ kg/cm^2$ گسیخته شود، در آن صورت ضریب اطمینان در سطح AB چندبرابر ضریب اطمینان در سطح CD خواهد بود؟ $(\tan 23^\circ = 0/42)$



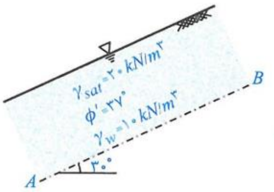
۱) $\frac{1}{2}$

۲) $\frac{2}{3}$

۳) ۱

۴) ۲

۲- یک شیروانی خاکی نامحدود از جنس ماسه، مطابق شکل زیر موجود است. درصورت خشک شدن کامل لایه ماسه‌ای، ضریب اطمینان در سطح لغزش AB .... و شیروانی ....



۱) تغییری نمی‌کند - همچنان پایدار است.

۲) تغییری نمی‌کند - بسته به مقدار H می‌تواند پایدار یا ناپایدار باشد.

۳) دوبرابر شده - پایدار می‌گردد.

۴) دوبرابر شده - بسته به مقدار H می‌تواند پایدار یا ناپایدار باشد.

۳- در تحلیل لغزش انتقالی در شیب‌های ماسه‌ای که سطح آب زیرزمینی بر سطح شیب واقع است، ضریب اطمینان تقریبی از کدام رابطه به‌دست می‌آید؟ (ϕ' زاویه اصطکاک داخلی خاک و β زاویه شیب با افق می‌باشد.) (سراسری - ۸۵)

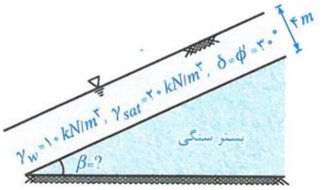
۱) $FS \simeq 2\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)$

۲) $FS \simeq 2\left(\frac{\tan\beta}{\tan\phi'}\right)$

۳) $FS \simeq 0/5\left(\frac{\tan\beta}{\tan\phi'}\right)$

۴) $FS \simeq 0/5\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)$

۴- یک لایه ماسه‌ای نامحدود مطابق شکل زیر روی یک بستر سنگی قرار دارد. حداکثر شیب بستر سنگی چقدر باشد تا ضریب اطمینان پایداری شیروانی برابر ۲ شود؟



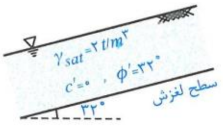
۱) $\tan\beta = \frac{4\sqrt{3}}{3}$

۲) $\tan\beta = \frac{\sqrt{3}}{12}$

۳) $\tan\beta = \frac{2\sqrt{3}}{3}$

۴) $\tan\beta = \frac{\sqrt{3}}{6}$

۵- شیروانی نامحدودی در شرایط اشباع با مشخصات زیر موجود است. وضعیت پایداری آن چگونه است؟



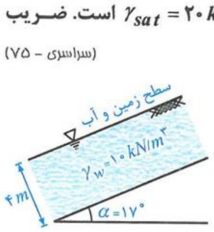
۱) پایدار است.

۲) ناپایدار است.

۳) درصورت افزایش زاویه شیب، شیروانی ناپایدار می‌شود.

۴) پایداری آن بستگی کامل به ضخامت لایه خاک دارد.

۶- شکل زیر یک لایه ماسه‌ای را نشان می‌دهد که برروی یک بستر سنگی مورب مسطح قرار دارد. سطح آزاد جریان بر سطح زمین منطبق است و زاویه اصطکاک ماسه و سنگ $\phi' = 37^\circ$، زاویه شیب بستر سنگی $\alpha = 17^\circ$ و وزن مخصوص اشباع ماسه $\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3$ است. ضریب اطمینان ماسه در مقابل لغزش برابر کدام است؟ $(\tan 17^\circ = 0/3)$ (سراسری - ۷۵)



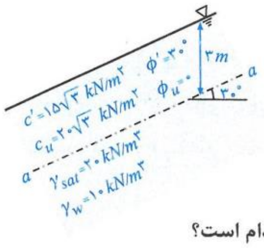
۱) $FS = 4/3$

۲) $FS = 2/2$

۳) $FS = 1/25$

۴) غیرقابل محاسبه $= FS$

۷- یک شیروانی خاکی اشباع از جنس رس مطابق شکل ساخته شده است. ضریب اطمینان این شیب در مقابل لغزش ناگهانی در امتداد سطح $a-a$، بلافاصله بعد از ساخت چقدر است؟



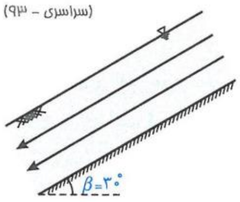
۱) ۱
۲) ۱/۵
۳) ۲
۴) هیچکدام

۸- در تست قبل ضریب اطمینان شیروانی در مقابل لغزش در امتداد سطح $a-a$، مدت‌ها پس از ساخت کدام است؟

۱) ۱ ۲) ۱/۵ ۳) ۲ ۴) هیچکدام

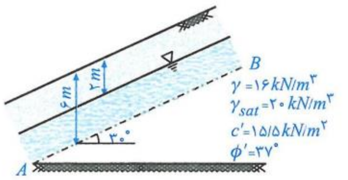
۹- یک شیب ماسه‌ای اشباع با زاویهٔ شیب $\beta = 30^\circ$ را در نظر بگیرید. درصورتی‌که جریان آب به موازات شیب فرض شود، زاویهٔ اصطکاک داخلی ϕ برای این خاک چند درجه باید باشد تا ضریب اطمینان این شیب در مقابل لغزش ۱/۵ باشد؟ ($\gamma_w = 10\ kN/m^3$ و $\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3$)

(سراسری - ۹۳)



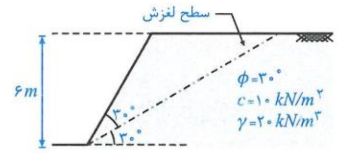
۱) ۲۲/۵
۲) ۴۵
۳) ۳۰
۴) ۶۰

۱۰- در شیروانی شکل مقابل ضریب اطمینان پایداری در برابر لغزش (در امتداد سطح AB) برابر است با:



۱) $\sqrt{3}$
۲) $\frac{\sqrt{3}}{2}$
۳) $\frac{2}{\sqrt{3}}$
۴) $\frac{\sqrt{3}}{3}$

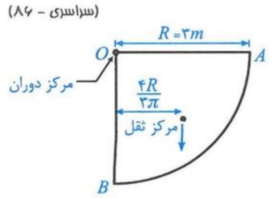
۱۱- با برقراری تعادل گوهٔ درحال لغزش، ضریب اطمینان شیروانی برای سطح لغزش نشان داده شده کدام است؟ (سراسری - ۸۴)



۱) ۱/۹
۲) ۱/۷
۳) ۱/۵۷
۴) $\frac{1}{2}$

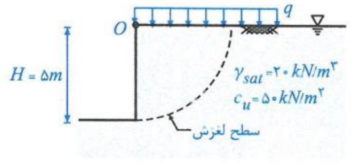
۱۲- یک ترانشه قائم از خاک رسی اشباع با $(c_u = 2\ t/m^2,\ \gamma = 2\ t/m^3,\ \phi_u = 0)$ مورد نظر است. ضریب اطمینان برای دوران حول نقطه O با سطح لغزش فرضی ربع دایره (AB) چه میزان است؟

(سراسری - ۸۶)



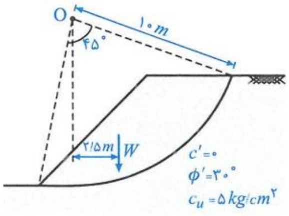
۱) $\frac{1}{\pi}$
۲) $\frac{\pi}{2}$
۳) $\frac{2}{\pi}$
۴) π

۱۳- در شکل زیر ضریب اطمینان ترانشهٔ قائم در برابر لغزش، در یک طرح کوتاه‌مدت نباید از ۱/۵۷ کمتر شود. حداکثر مقدار سربار q چقدر است؟ (سطح لغزش، ربع دایره‌ای به مرکز O است.)



۱) $33/3\ kN/m^2$
۲) $66/7\ kN/m^2$
۳) $100\ kN/m^2$
۴) هیچکدام

۱۴- در شیروانی شکل زیر که در اثر گودبرداری از یک لایه خاک رس اشباع ایجاد شده، ضریب اطمینان در پایداری کوتاه‌مدت چقدر است؟ سطح گسیختگی شیروانی دایره‌ای به شعاع ۱۰ متر و وزن قسمت دایره‌ای خاک (بلوک لغزش) برابر $2000\ ton/m$ می‌باشد. ($\pi \simeq 3$)

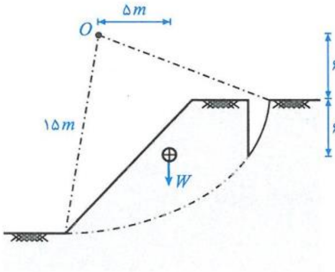


۱) ۱/۳۳
۲) ۱/۲۵
۳) ۱
۴) ۰/۷۵

۱۵- گودبرداری در یک لایه رس اشباع با مشخصات زیر انجام شده است:

$\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3\ , c_u = 40\ kN/m^2\ ,\ \phi_u = 0\ ,\ \gamma_w = 10\ kN/m^3$

اگر طول قوس دایرهٔ لغزش ۲۵ متر و مساحت بلوک لغزش $100 m^2$ باشد، ضریب اطمینان پایداری کوتاه‌مدت این شیب به کدام‌یک از اعداد زیر نزدیک‌تر است؟ ترک کششی پر از آب است. (سراسری - ۸۷)



۱) ۱/۱
۲) ۰/۹۵
۳) ۱/۲۵
۴) ۱/۴۵

پاسخ تست‌های فصل نهم

(۳) -۱

ابتدا چسبندگی خاک را با توجه به اطلاعات صورت سؤال و نتایج آزمایش برش مستقیم به‌دست می‌آوریم:

$$\begin{cases} \phi = ۳۰^\circ \text{ (طبق شکل)} \\ \tau = \sigma \tan\phi + c \Rightarrow ۱/۷۳ = ۳\times\frac{\sqrt{۳}}{۳} + c = \sqrt{۳} + c \Rightarrow c = ۰ \end{cases}$$

$\sqrt{۳} = ۱/۷۳$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید $c = ۰$ به‌دست آمده است، بنابراین خاک شیروانی از نوع دانه‌ای بوده و ضریب اطمینان در مقابل لغزش برای این شیروانی خشک، از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$FS = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \xrightarrow{\phi \text{ و } \beta \text{ ثابت}} \frac{FS_{AB}}{FS_{CD}} = ۱$$

توجه: اگرچه چسبندگی خاکِ شیروانی صفر است ولی با توجه به خشک بودن آن، این خاک نمی‌تواند رس عادی تحکیم یافته (که اشباع است) باشد.

(۳) -۲

طبق مطالب خوانده شده در متن درس، در یک شیروانی ماسه‌ای اشباع، ضریب اطمینان در مقابل لغزش برابر است با:

$$FS_{\text{حالت اشباع}} = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right) = \left(\frac{۲۰-۱۰}{۲۰}\right)\left(\frac{\tan ۳۷^\circ}{\tan ۳۰^\circ}\right) = \left(\frac{۱}{۲}\right)\times\left[\frac{(\frac{۳}{۴})}{(\frac{\sqrt{۳}}{۳})}\right] = ۰/۶۳ < ۱ \Rightarrow \text{شیروانی ناپایدار است.}$$

حال اگر شیروانی خشک شود، ضریب اطمینان پایداری این شیروانی ماسه‌ای در مقابل لغزش برابر می‌شود با:

$$FS_{\text{حالت خشک}} = \frac{\tan\phi}{\tan\beta}$$

می‌دانیم در خاک‌های ماسه‌ای $\phi = \phi'$ است، بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع، مقدار ضریب اطمینان شیروانی در حالت خشک برابر می‌شود با:

$$FS_{\text{حالت خشک}} = \frac{\tan\phi}{\tan\beta} = \frac{(\frac{۳}{۴})}{(\frac{\sqrt{۳}}{۳})} = \frac{۳\sqrt{۳}}{۴} \simeq ۱/۲۶ > ۱ \Rightarrow \text{شیروانی پایدار است.}$$

ملاحظه می‌کنید که در حالت خشک، ضریب اطمینان در مقابل لغزش، دو برابر شده و شیروانی ماسه‌ای پایدار می‌گردد.

(۴) -۳

طبق مطالب گفته شده در متن درس (نکته ۱ در بحث شیروانی‌های نامحدود و اشباع)، داریم:

$$FS = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right) \xrightarrow{\gamma' \simeq ۰/۵\gamma_{sat}} FS \simeq ۰/۵\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)$$

(۲) -۴

ابتدا مشابه با دو تست قبل، رابطهٔ ضریب اطمینان شیروانی را برای خاک ماسه‌ای در حالت اشباع می‌نویسیم:

$$FS = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right) = \left(\frac{۲۰-۱۰}{۲۰}\right)\times\left[\frac{(\frac{\sqrt{۳}}{۳})}{\tan\beta}\right] = \frac{\sqrt{۳}}{۶\tan\beta}$$

حال برای آنکه طبق خواستهٔ سؤال $FS = ۲$ شود، خواهیم داشت:

$$۲ = \frac{\sqrt{۳}}{۶\tan\beta} \Rightarrow \tan\beta = \frac{\sqrt{۳}}{۱۲}$$

۵- (۲)

برای این شیروانی که خاک آن دانه‌ای ($c=0$) و اشباع است، ضریب اطمینان را به‌صورت زیر تعیین می‌کنیم تا وضعیت پایداری آن مشخص گردد:

$$FS=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)=\left(\frac{2-1}{2}\right)\times\left(\frac{\tan 32^\circ}{\tan 32^\circ}\right)=0/5<1 \Rightarrow$$ شیروانی ناپایدار است.

۶- (۳)

همانطورکه در متن درس گفته شد، اگر شیروانی خاکی روی یک بستر سنگی قرار بگیرد، در آن‌صورت این بستر سنگی محتمل‌ترین سطح لغزش برای شیب خاکی خواهد بود و ما برای محاسبهٔ ضریب اطمینان بایستی از پارامترهای مقاومتی خاک و سنگ استفاده کنیم. از این‌رو در حل این سؤال خواهیم داشت:

$$\begin{cases} FS=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)\ (c=0 \text{ خاک ماسه‌ای}) \\ \delta=\phi'=37^\circ\ ,\ \beta=\alpha=17^\circ \end{cases} \Rightarrow FS=\left(\frac{20-10}{10}\right)\times\left(\frac{\tan 37^\circ}{\tan 17^\circ}\right)=\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{0/75}{0/3}\right)=1/25$$

۷- (۴)

لغزش ناگهانی شیروانی بلافاصله بعد از ساخت، در بحث پایداری کوتاه‌مدت شیروانی مطرح می‌شود و بایستی از پارامترهای حالت تحکیم نیافته و زهکشی نشدهٔ خاک رسی استفاده کنیم. بنابراین طبق آنچه در متن درس گفته شد، می‌نویسیم:

$$FS=\frac{\tau_f}{\tau}\ ,\ \tau_f=c_u \Rightarrow FS=\frac{c_u}{\gamma_{sat}H\sin\beta\cos\beta}=\frac{20\sqrt{3}}{20\times3\times\sin30^\circ\times\cos30^\circ}=\frac{4}{3}=1/33$$

۸- (۲)

لغزش تدریجی شیروانی مدت‌ها پس از ساخت، تداعی کنندهٔ حالت تحکیم‌یافته و زهکشی شده در شیروانی است (بحث پایداری بلندمدت)، بنابراین طبق آنچه در متن درس گفته شد، خواهیم داشت:

$$FS=\frac{\tau_f}{\tau}=\frac{\sigma'\tan\phi'+c'}{\tau}=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right)+\frac{c'}{\gamma_{sat}H\sin\beta\cos\beta}=\left(\frac{20-10}{20}\right)\times\left(\frac{\tan30^\circ}{\tan30^\circ}\right)+\frac{15\sqrt{3}}{20\times3\times\sin30^\circ\times\cos30^\circ}=1/5$$

۹- (۴)

مشابه با تست‌های قبل برای شیروانی ماسه‌ای در حالت اشباع داریم:

$$FS=\frac{\gamma'}{\gamma_{sat}}\left(\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}\right) \Rightarrow 1/5=\left(\frac{20-10}{20}\right)\times\left(\frac{\tan\phi'}{\tan30^\circ}\right) \Rightarrow \tan\phi'=\sqrt{3} \Rightarrow \phi'=60^\circ$$

۱۰- (۳)

ضریب اطمینان برای این شیروانی که از دو لایه خاک تشکیل شده است، برابر است با:

$$FS=\frac{(\sum\gamma' H\cos^2\beta)\tan\phi'+c}{\sum\gamma H\sin\beta\cos\beta}=\frac{[(16)\times(2)\times(\cos^2 30^\circ)+(20-10)\times(6-2)\times(\cos^2 30^\circ)]\times0/75+15/5}{16\times2\times\sin30^\circ\times\cos30^\circ+20\times(6-2)\times\sin30^\circ\times\cos30^\circ}$$

$$=\frac{40/5+15/5}{28\sqrt{3}}=\frac{2}{\sqrt{3}}$$

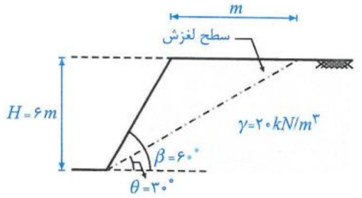
۱۱- (۳)

در حل این تست مشابه با تمرین (۱۰) عمل کرده و ابتدا رابطهٔ ضریب اطمینان را به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$FS=\frac{\left(\frac{W\cos\theta}{A}\right)\tan\phi+c}{\left(\frac{W\sin\theta}{A}\right)}$$

حال در رابطهٔ صفحهٔ قبل، برای محاسبهٔ W و A خواهیم داشت:

● محاسبهٔ W:



$$\begin{cases} W = \frac{۱}{۲}\gamma m H \\ m = H(\cot\theta - \cot\beta) = ۶\times(\cot ۳۰ - \cot ۶۰) = ۶\times(\sqrt{۳} - \frac{\sqrt{۳}}{۳}) = ۴\sqrt{۳}\ m \end{cases}$$

$$\Rightarrow W = \frac{۱}{۲}\times ۲۰\times ۴\sqrt{۳}\times ۶ = ۲۴۰\sqrt{۳}\ kN/m$$

● محاسبهٔ A:

$$A = \frac{H}{\sin\theta} = \frac{۶}{\sin ۳۰^\circ} = \frac{۶}{(\frac{۱}{۲})} = ۱۲\ m^۲/m$$

در نهایت با جایگذاری W و A در رابطهٔ FS، مقدار ضریب اطمینان را به‌صورت زیر به‌دست می آوریم:

$$FS = \frac{(\frac{۲۴۰\sqrt{۳}\times\cos ۳۰^\circ}{۱۲})\times\tan ۳۰^\circ + ۱۰}{(\frac{۲۴۰\sqrt{۳}\times\sin ۳۰^\circ}{۱۲})} = \frac{۱۰\sqrt{۳}+۱۰}{۱۰\sqrt{۳}} = ۱ + \frac{\sqrt{۳}}{۳} = ۱/۵۷$$

$$\frac{\sqrt{۳}}{۳} = \frac{۱/۷۱}{۳} = ۰/۵۷$$

۱۲- (۲)

با توجه به دایره‌ای بودن سطح لغزش، رابطهٔ ضریب اطمینان به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

نیروی مقاومت کننده روی سطح لغزش ← $\tau_f L$

$$FS = \frac{\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر لغزش}}{\text{لنگر سبب لغزش}} = \frac{\tau_f L\ R}{W\times d}$$

حال مقدار اجزاء تشکیل‌دهندهٔ رابطهٔ ضریب اطمینان را محاسبه می‌کنیم:

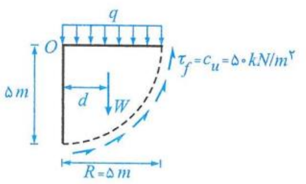
$$\begin{cases} L = R\theta = ۳\times\frac{\pi}{۲} = \frac{۳\pi}{۲}\ m \\ \varphi = ۰ \Rightarrow \tau_f = c_u = ۲\ t/m^۲ \\ W = \gamma V = (۲)(\frac{۱}{۴}\pi\times ۳^۲\times ۱) = \frac{۹\pi}{۲}\ kN/m \\ d = \frac{۴R}{۳\pi} = \frac{۴\times ۳}{۳\pi} = \frac{۴}{\pi}\ m \end{cases}$$

و در انتها با جایگذاری این مقادیر در رابطهٔ FS، می‌توانیم مقدار ضریب اطمینان در مقابل لغزش را به‌دست آوریم:

$$FS = \frac{۲\times\frac{۳\pi}{۲}\times ۳}{\frac{۹\pi}{۲}\times\frac{۴}{\pi}} = \frac{\pi}{۲}$$

۱۳- (۱)

حل این تست مانند تست قبل می‌باشد، با این تفاوت که در محاسبهٔ لنگر سبب لغزش، باید لنگر ناشی از سربار q را نیز لحاظ کنیم. بنابراین رابطهٔ ضریب اطمینان در مقابل لغزش به‌صورت زیر خواهد شد:



$$FS = \frac{\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر لغزش}}{\text{لنگر سبب لغزش}} = \frac{\tau_f RL}{Wd + \frac{qR^۲}{۲}}$$

که در رابطهٔ صفحهٔ قبل:

$$\begin{cases} \tau_f = c_u = ۵۰\ kN/m^۲ \quad , \quad R = ۵\ m \\ W = \gamma V = ۲۰ \times \frac{۱}{۴} \pi R^۲ = (۲۰)(\frac{۱}{۴} \times \pi \times ۵^۲ \times ۱) = ۱۲۵\pi \ \ kN/m \\ L = R\theta = ۵ \times \frac{\pi}{۲} = \frac{۵\pi}{۲} m \quad , \quad d = \frac{۴R}{۳\pi} = \frac{۴ \times ۵}{۳\pi} = \frac{۲۰}{۳\pi} m \end{cases}$$

حال برای آنکه ضریب اطمینان از ۱/۵۷ (یا همان $\frac{\pi}{۲}$) کمتر نشود، می‌نویسیم:

$$FS \ge \frac{\pi}{۲} \Rightarrow \frac{\tau_f RL}{Wd + \frac{qR^۲}{۲}} \ge \frac{\pi}{۲} \Rightarrow \frac{۵۰ \times ۵ \times \frac{۵\pi}{۲}}{۱۲۵\pi \times \frac{۲۰}{۳\pi} + \frac{q \times ۵^۲}{۲}} \ge \frac{\pi}{۲} \Rightarrow \frac{۱۰۰}{۳} + \frac{q}{۲} \le ۵۰ \Rightarrow \frac{q}{۲} \le \frac{۵۰}{۳} \Rightarrow q \le ۳۳/۳\ kN/m^۲$$

۱۴- (۴)

مشابه با تست (۱۲)، رابطهٔ ضریب اطمینان در برابر لغزش در این شیروانی را به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$FS = \frac{\tau_f RL}{Wd} \xrightarrow[\text{نکات متن درس}]{L = R\theta} FS = \frac{\tau_f R^۲ \theta}{Wd}$$

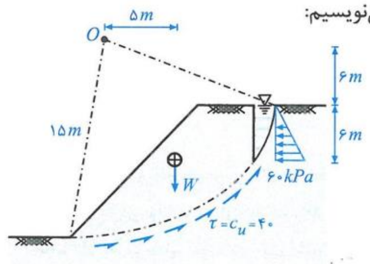
از آنجا که پایداری شیروانی در کوتاه مدت مدنظر است، بنابراین $\tau_f = c_u$ بوده و خواهیم داشت:

$$FS = \frac{(۵ \times \boxed{۱۰})(۱۰^۲)(\frac{\pi}{۴})}{۲۰۰۰ \times ۲/۵} = \frac{\pi}{۴} \simeq \frac{۳}{۴} = ۰/۷۵$$

(تبدیل $kg/cm^۲$ به $t/m^۲$)

۱۵- (۳)

حل این تست مشابه تمرین (۱۵) در متن درس است، بنابراین ابتدا رابطهٔ ضریب اطمینان را می‌نویسیم:



$$FS = \frac{\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر لغزش}}{\text{لنگر سبب لغزش}}$$

حال لنگر سبب لغزش و حداکثر لنگر مقاوم در برابر لغزش را به‌صورت زیر می‌یابیم:

- محاسبهٔ لنگر سبب لغزش

لنگر ناشی از فشار هیدرواستاتیک آب در ترک + لنگر ناشی از نیروی وزن بلوک لغزش = لنگر سبب لغزش

$$= \boxed{W} \times d + \boxed{F_w} \times d = (۲۰ \times ۱۰۰ \times ۱) \times (۵) + (\frac{۱}{۲} \times ۱۰ \times ۶^۲ \times ۱) \times (۶ + \frac{۲}{۳} \times ۶) = ۱۱۸۰۰\ kN.m/m$$

($W \to \gamma_{sat} V$ ، $F_w \to \frac{۱}{۲} \gamma_w z_{cr}^۲$)

- محاسبه حداکثر لنگر مقاوم در برابر لغزش

$$\text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر لغزش} = \tau_f RL \xrightarrow[\tau_f = c_u]{\text{پایداری کوتاه مدت}} \text{حداکثر لنگر مقاوم در برابر لغزش} = ۴۰ \times ۱۵ \times ۲۵ = ۱۵۰۰۰\ kN.m/m$$

در نهایت با جایگذاری مقادیر فوق در رابطهٔ FS، ضریب اطمینان در برابر لغزش به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

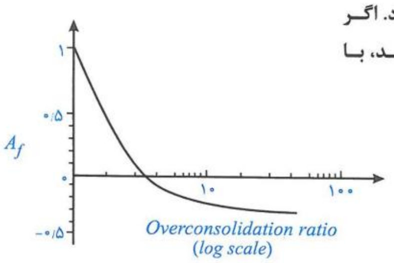
$$FS = \frac{۱۵۰۰۰}{\boxed{۱۱۸۰۰}} \simeq ۱/۲۵$$

($۱۱۸۰۰ \to \simeq ۱۲۰۰۰$)

توجه: منظور از قوس دایرهٔ لغزش، قسمت خط‌چین است که در شکل سؤال نشان داده شده است و طول آن برابر ۲۵ متر می‌باشد. بنابراین در محاسبهٔ L نبایستی $z_{cr} = ۶\ m$ را از ۲۵ متر کم کنیم.

سوالات آزمون سراسری ۹۴

۱- شالوده‌ای بر روی یک لایه خاک رس اشباع پیش تحکیم یافته با $OCR = ۴$ قرار دارد. اگر تنش‌های کل قائم و افقی وارد بر خاک به‌ترتیب به اندازهٔ $۲۰\ kPa$ و $۸\ kPa$ افزایش یابند، با استفاده از رابطه اسکمپتون، مقدار تغییر در فشار آب منفذی بر حسب kPa چقدر است؟



۱) ۶/۸ -
۲) ۶/۸
۳) ۹/۲ -
۴) ۹/۲

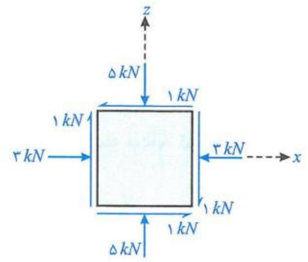
۲- درصد رطوبت طبیعی یک نوع خاک قرضه ۱۰ درصد است. در صورتی‌که ۵/۵ کیلوگرم از این خاک مرطوب جهت آزمایش تراکم به کار رود، حدوداً چه مقدار آب (برحسب gr) باید به این خاک اضافه کرد تا درصد رطوبت آن به ۱۲/۵ درصد برسد؟

۱) ۱۴۵ ۲) ۱۳۵ ۳) ۱۲۵ ۴) ۱۱۵

۳- یک آزمایش نفوذپذیری با هدافتان روی یک نوع خاک به ارتفاع $۳۰\ cm$ و سطح $۷۵۰\ cm^۲$ انجام شده است. با افت ایستابی برابر $۶۰\ cm$، پس از مدت زمان $۱۵۰\ sec$، مقدار آب عبوری از خاک برابر $۲۵۰\ ml$ است. ضریب نفوذپذیری خاک برحسب cm/sec حدوداً چقدر است؟

۱) $۱/۱ \times ۱۰^{-۳}$ ۲) $۲/۵ \times ۱۰^{-۳}$ ۳) $۴/۲ \times ۱۰^{-۱}$ ۴) $۷/۸ \times ۱۰^{-۱}$

۴- نیروهای وارده بر سطوح یک المان خاک مطابق شکل مقابل است. تنش‌های اصلی و تانژانت زاویهٔ صفحات اصلی با محور افقی چقدر است؟ طول هر یک از یال‌های المان موردنظر، $۱۰۰\ mm$ می‌باشد.

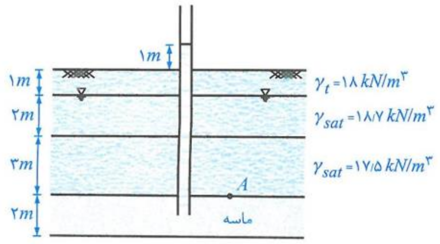


۱) $\tan\psi = ۱$، $\sigma_۳ = ۲۵۸/۶\ kPa$، $\sigma_۱ = ۵۴۱/۴\ kPa$
۲) $\tan\psi = ۰/۴۱$، $\sigma_۳ = ۲۵۸/۶\ kPa$، $\sigma_۱ = ۵۴۱/۴\ kPa$
۳) $\tan\psi = ۱$، $\sigma_۳ = ۲۵/۸۶\ kPa$، $\sigma_۱ = ۵۴/۱۴\ kPa$
۴) $\tan\psi = ۰/۴۱$، $\sigma_۳ = ۲۵/۸۶\ kPa$، $\sigma_۱ = ۵۴/۱۴\ kPa$

۵- در یک آزمایش تک محوری (*Unconfined Compression Test*) بر روی یک نمونه خاک رس اشباع به قطر $۴۰\ mm$ و ارتفاع $۸۰\ mm$، حداکثر نیروی وارده در لحظه گسیختگی $۱۰۰\ N$ اندازه‌گیری شده است. مقاومت برشی زهکشی نشده این خاک (S_u) برحسب kPa چقدر است؟ از تغییر قطر نمونه در حین آزمایش صرف‌نظر کنید.

۱) ۹/۹۵ ۲) ۱۹/۹ ۳) ۳۹/۸ ۴) ۷۹/۶۰

۶- در پروفیل نشان داده شده در شکل، فشار آرتزین در لایه پایینی ماسه وجود دارد. فشار آرتزین مزبور توسط لوله پیزومتر نشان داده شده است.



الف) تنش مؤثر در نقطه A برحسب $kN/m^۲$ چقدر است؟

ب) اگر با پمپاژ سطح آب زیرزمینی به اندازه $۲m$ پایین آورده شود، تنش مؤثر در نقطه A برحسب $kN/m^۲$ در حدود چقدر تغییر خواهد کرد؟ (فرض کنید بعد از پایین آوردن سطح آب، رطوبت خاک مشابه لایه بالایی باشد.)

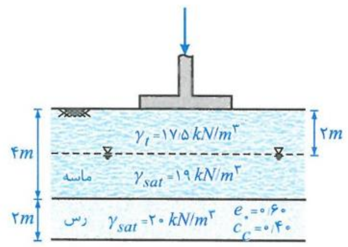
۱) الف) ۳۷/۹، ب) ۱۸/۶ ۲) الف) ۱۷۷/۹، ب) ۱۸/۶
۳) الف) ۳۷/۹، ب) ۲۴/۶ ۴) الف) ۱۷۷/۹، ب) ۲۴/۶

۷- یک لایه رس اشباع با ضخامت ۲/۰ متر دارای درصد رطوبت ۵۰ و G_s برابر با ۲/۷ است. ضرایب تحکیم C_c (ضریب تحکیم بارگذاری) و C_r (ضریب تحکیم باربرداری) برای این خاک در آزمایشگاه به‌ترتیب ۰/۴ و ۰/۰۸ به‌دست آمده‌اند. با اطلاعات زیر، نشست تحکیمی این لایه خاک حدوداً چند میلی‌متر (mm) است؟

$۷۰۰\ kPa$ = تنش پیش تحکیمی , $۶۰۰\ kPa$ = تنش مؤثر قائم نهایی در وسط لایه , $۳۰۰\ kPa$ = تنش مؤثر قائم اولیه در وسط لایه

۱) ۱۵۰ ۲) ۱۰۰ ۳) ۳۰ ۴) ۲۰

۸- در شکل مقابل در صورتی‌که فشار اضافی حاصل از بار پی وارد بر وسط لایه رس عادی تحکیم یافته برابر $190\ kN/m^2$ باشد، نشست نهایی پی برحسب cm حدوداً چقدر است؟ $(\gamma_w = 10\ kN/m^3)$



۱) ۴۰
۲) ۳۵
۳) ۳۰
۴) ۲۰

۹- برای ساخت هسته نفوذناپذیر یک سد خاکی، خاکریز بدنهٔ یک راه و پوشش خاکی یک کانال آبرسانی، (به‌ترتیب از راست به چپ) استفاده از چه نوع خاکی قابل توجیه است؟

۱) $GC - GW - GC$
۲) $ML - GC - CL$
۳) $SW - SM - CL$
۴) $ML - SM - SC$

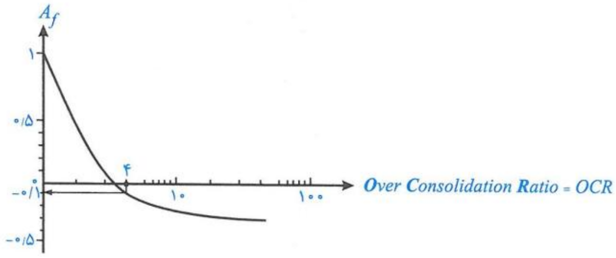
۱۰- در یک شیب ماسه‌ای اشباع با طول زیاد، سطح آزاد تراوش آب، بر سطح شیب منطبق است. اگر زاویهٔ شیب $30°$ درجه باشد، زاویهٔ اصطکاک داخلی ماسه برای آنکه ضریب اطمینان پایداری شیب از $\frac{\sqrt{3}}{2}$ کمتر نشود، چقدر است؟ $(\gamma_w = 10\ kN/m^3$ ، $\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3)$

۱) $\phi' = 60°$
۲) $\phi' = 45°$
۳) $\phi' = 30°$
۴) $\phi' = 22/5°$

پاسخ سوالات آزمون سراسری ۹۴

۱- (۲)

برای حل این تست ابتدا با کمک نمودار داده شده در صورت سؤال، مقدار پارامتر A اسکمپتون (همان A_f) را می‌یابیم:



$A_f = -۰/۱$

از طرفی می‌دانیم در صورت اشباع بودن خاک، پارامتر B اسکمپتون برابر یک است ($B=۱$). بنابراین با استفاده از رابطهٔ اسکمپتون که در **فصل هشتم کتاب (صفحهٔ ۴۱۴)** ارائه شد، می‌نویسیم:

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_۳ + A(\Delta\sigma_۱ - \Delta\sigma_۳)] = ۱\times[۸+(-۰/۱)(۲۰-۸)] = ۶/۸\ kPa$$

تذکر: در این سؤال گویا تغییرات فشار آب حفره‌ای تا لحظهٔ گسیختگی مدنظر طراح بوده است و به همین دلیل نمودار OCR در برابر A_f (پارامتر A اسکمپتون در لحظهٔ گسیختگی) در صورت سؤال داده شده است. اما جالب است بدانید در یک پی (که در صورت سؤال به آن اشاره شده است) ما به دنبال گسیختگی خاک نیستیم و همواره با اعمال ضریب اطمینان، خاک را از محدودهٔ گسیختگی دور می‌کنیم. پس به نظر می‌رسد که این سؤال به لحاظ مفهومی ایراد دارد.

۲- (۳)

در **فصل اول کتاب (صفحهٔ ۲۲)** دیدیم که اگر در صورت یک سؤال مقدار وزن کل و میزان رطوبت خاک داده شوند، بسادگی می‌توانیم وزن قسمت‌های مختلف تودهٔ خاک را به‌دست آوریم، از این رو ابتدا با حل دستگاه مقابل، مقدار W_s را می‌یابیم:

$$\begin{cases} W_w + W_s = W_{\text{کل}} \\ \omega = \dfrac{W_w}{W_s} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} W_w + W_s = ۵/۵ \\ ۰/۱ = \dfrac{W_w}{W_s} \end{cases} \Rightarrow ۵/۵ = ۰/۱\,W_s + W_s \Rightarrow W_s = ۵\ kg$$

حال در ادامه با کمک رابطهٔ محاسبهٔ درصد رطوبت، خواهیم داشت:

$$\underbrace{\Delta\omega}_{۱۲/۵-۱۰=۲/۵\%} = \frac{\Delta W_w}{\underbrace{W_s}_{۵}} \Rightarrow \frac{۲/۵}{۱۰۰} = \frac{\Delta W_w}{۵} \Rightarrow \Delta W_w = ۰/۱۲۵\ kg = ۱۲۵\ gr$$

۳- (۱)

اگرچه در صورت سؤال اشاره شده است که آزمایش موردنظر، آزمایش با بار آبی متغیر (هد افتان) می‌باشد، ولی اطلاعات داده شده به‌گونه‌ای است که به ناچار بایستی از روش تعیین نفوذپذیری خاک در آزمایش با بار آبی ثابت استفاده کنیم. بر همین اساس و با توجه به مطالب گفته شده در **قسمت تکمیلی فصل چهارم کتاب (صفحهٔ ۱۶۰)**، از رابطهٔ محاسبهٔ دبی جریان به هنگام حرکت آب در خاک استفاده کرده و می‌نویسیم:

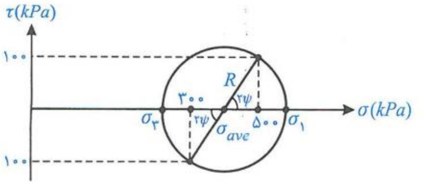
$$\underbrace{Q}_{\frac{\text{حجم}}{\text{زمان}}} = kA\left(\frac{\Delta h}{L}\right) \Rightarrow \left(\frac{۲۵۰\times \overbrace{۱۰^{-۶}}^{\text{تبدیل میلی لیتر به متر مکعب}}}{۱۵۰}\right) = (k)(۷۵۰\times \underbrace{۱۰^{-۴}}_{\text{تبدیل } cm^۲ \text{ به } m^۲})\left(\frac{۶۰}{۳۰}\right) \Rightarrow k = ۱/۱\times۱۰^{-۵}\ m/s = ۱/۱\times۱۰^{-۳}\ cm/s$$

تذکر: می‌دانیم آزمایش با بار آبی ثابت مخصوص درشت‌دانه‌ها بوده و آزمایش با بار آبی متغیر برای تعیین ضریب نفوذپذیری ریزدانه‌ها به‌کار می‌رود. جالب اینکه عدد به‌دست آمده برای ضریب نفوذپذیری خاک در این تست ($K=۱/۱\times۱۰^{-۳}\ cm/s$) مربوط به یک خاک درشت‌دانه است (**جدول صفحهٔ ۱۳۴کتاب را ببینید**) و اصولاً مطرح کردن آزمایش با بار آبی متغیر برای آن اشتباه است.

(۲) -۴

این تست عملاً مربوط به درس مقاومت مصالح است که با کمک مطالب خوانده شده دربارهٔ دایره مور و بحث تبدیل تنش‌ها قابل حل است. ما برای شروع حل این تست، ابتدا نیروهای وارد شده به المان را به تنش تبدیل کرده و سپس به شکل زیر دایرهٔ مور مربوط به این تنش‌ها را ترسیم می‌کنیم:

$$\sigma_x=\frac{P_x}{A}=\frac{۳}{۰/۱\times ۰/۱}=۳۰۰\ kPa \quad , \quad \sigma_z=\frac{P_z}{A}=\frac{۵}{۰/۱\times ۰/۱}=۵۰۰\ kPa \quad , \quad \tau_{xz}=\frac{T_{xz}}{A}=\frac{۱}{۰/۱\times ۰/۱}=۱۰۰\ kPa$$



حال در ادامه با توجه به دایرهٔ مور ترسیم شده، خواهیم داشت:

$$\sigma_{ave}=\frac{\sigma_۱+\sigma_۳}{۲}=\frac{\sigma_z+\sigma_x}{۲}=\frac{۵۰۰+۳۰۰}{۲}=۴۰۰\ kPa \Rightarrow \boxed{\sigma_۱+\sigma_۳=۸۰۰\,kPa} \quad (I)$$

$$tan\,۲\psi=\frac{\tau_{xz}}{\sigma_z-\sigma_{ave}}=\frac{۲\tau_{xz}}{\sigma_z-\sigma_x}=\frac{۲\times ۱۰۰}{۵۰۰-۳۰۰}=۱ \Rightarrow ۲\psi=۴۵^\circ$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \psi=۲۲/۵^\circ \Rightarrow tan\,\psi=tan\,۲۲/۵^\circ=۰/۴۱ \ (\text{با توجه به گزینه‌ها، قطعاً } tan\,\psi=۱ \text{ نیست!}) \\ sin\,۲\psi=\frac{\tau_{xz}}{R}=\frac{۲\tau_{xz}}{\sigma_۱-\sigma_۳} \Rightarrow \boxed{sin\,۴۵^\circ}=\frac{۲\times ۱۰۰}{\sigma_۱-\sigma_۳} \Rightarrow \boxed{\sigma_۱-\sigma_۳\simeq ۲۸۲\ kPa} \quad (II) \end{cases}$$

$$sin\,۴۵^\circ \to \frac{\sqrt{۲}}{۲}=۰/۷۱$$

و در نهایت با کمک روابط (I) و (II)، مقادیر تنش‌های اصلی $\sigma_۱$ و $\sigma_۳$ به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\begin{cases} \sigma_۱+\sigma_۳=۸۰۰ \\ \sigma_۱-\sigma_۳=۲۸۲ \end{cases} \Rightarrow \sigma_۱=۵۴۱\ kPa \ , \ \sigma_۳=۲۵۹\ kPa$$

(۳) -۵

طبق آنچه در **فصل هشتم کتاب (صفحهٔ ۴۰۳)** گفته شد، در آزمایش تک محوری (آزمایش فشاری محدود نشده) بر روی خاک رس اشباع، مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ خاک (C_u یا همان S_u) برابر است با:

$$S_u=\frac{۱}{۲}\Delta\sigma_d$$

که مقدار $\Delta\sigma_d$ (که با $\sigma_۱$ برابر است) را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\Delta\sigma_d=\frac{F_d}{A}=\frac{۱۰۰}{(\frac{\pi\times ۰/۰۴^۲}{۴})}=\frac{۲۵۰\times ۱۰^۳}{\pi}Pa=۷۹/۶\ kPa$$

و در نهایت S_u برابر می‌شود با:

$$S_u=\frac{۱}{۲}\Delta\sigma_d=\frac{۱}{۲}\times ۷۹/۶=۳۹/۸\ kPa$$

(۱) -۶

الف) طبق اصل تنش مؤثر داریم:

$$\sigma'_A=\sigma_A-u_A=(۱۸\times ۱+۱۸/۷\times ۲+۱۷/۵\times ۳)-(۱۰\times ۷)=۳۷/۹\ kN/m^۲$$

ب) حال اگر فرض کنیم منظور طراح پایین آمدن سطح آب زیرزمینی در لایهٔ آرتزین هم باشد، در آن‌صورت می‌توان گفت:

$$\begin{cases} \Delta\sigma'=\Delta\sigma-\Delta u \\ \Delta\sigma=\boxed{\Delta h}\,(\gamma_{sat}-\gamma)=-۲\times(۱۸/۷-۱۸)=-۱/۴\ kN/m^۲ \\ \Delta u=\boxed{\Delta h}\,\gamma_w=-۲\times ۱۰=-۲۰\ kN/m^۲ \end{cases}$$

(Δh در رابطهٔ $\Delta\sigma$: پایین آمدن سطح آب در سفره آب زیرزمینی موجود)

(Δh در رابطهٔ Δu: پایین آمدن سطح آب در سفره آب لایه آرتزین (پیزومتر))

$$\Rightarrow \Delta\sigma'=-۱/۴-(-۲۰)=۱۸/۶\ kN/m^۲ \quad (\text{افزایش تنش مؤثر})$$

(۴) -۷

در حل این تست ابتدا وضعیت σ'_f نسبت به σ'_c را مشخص کرده و سپس با کمک مطالب خوانده شده در **فصل هفتم کتاب (صـفحهٔ ۲۹۵)**، رابطهٔ مناسب برای محاسبه نشست تحکیم را تعیین می‌کنیم:

$$\sigma'_f = ۶۰۰\ kPa < \sigma'_c = ۷۰۰\ kPa \Rightarrow \Delta H = \frac{H_۰}{۱+e_۰} C_r \log(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_۰})$$

حال در ادامه با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال خواهیم داشت:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow ۰/۵ \times ۲/۷ = ۱ \times e_۰ \Rightarrow e_۰ = ۱/۳۵$$

$$\Delta H = \frac{۲\times ۱۰^۳}{۱+۱/۳۵} \times ۰/۰۸ \log(\frac{۶۰۰}{۳۰۰}) = ۶۸ \underbrace{\log ۲}_{۰/۳} \simeq ۲۰\ mm$$

(۳) -۸

برای محاسبهٔ نشست تحکیم نهایی در زیر پی که ناشی از حضور لایهٔ رسی است، از رابطهٔ مربوط به خاک‌های رسی عادی تحکیم یافتـه کـه در **فصل هفتم کتاب (صفحهٔ ۲۹۴)** ارائه شده است، استفاده کرده و می‌نویسیم:

$$\begin{cases} \Delta H = \frac{H_۰}{۱+e_۰} C_c \log(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_۰}) \\ \sigma'_۰ = ۱۷/۵ \times ۲ + (۱۹-۱۰) \times ۲ + (۲۰-۱۰) \times ۱ = ۶۳\ kN/m^۲ \\ \sigma'_f = \sigma'_۰ + \Delta\sigma' = ۶۳ + ۱۹۰ = ۲۵۳\ kN/m^۲ \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta H = \frac{۲\times ۱۰۰}{۱+۰/۶} \times ۰/۴ \log(\frac{۲۵۳}{۶۳}) = ۵۰ \underbrace{\log ۴}_{\log ۲^۲ = ۲\log ۲} = ۱۰۰ \overbrace{\log ۲}^{۰/۳} = ۳۰\ cm$$

(۱) -۹

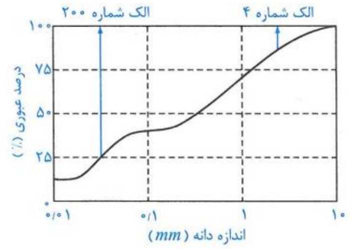
(۲) -۱۰

فرمول ضریب اطمینان پایداری این شیب ماسه‌ای اشباع را طبق رابطهٔ ارائه شده در **فصل نهم کتاب (صفحهٔ ۴۶۱، نکتهٔ ۱)** نوشته و با لحاظ کردن $FS = \frac{\sqrt{۳}}{۲}$، خواهیم داشت:

$$FS = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} (\frac{\tan\phi'}{\tan\beta}) \Rightarrow \frac{\sqrt{۳}}{۲} = (\frac{۲۰-۱۰}{۲۰})(\frac{\tan\phi'}{\tan ۳۰}) \Rightarrow \tan\phi' = ۱ \Rightarrow \phi' = ۴۵^\circ$$

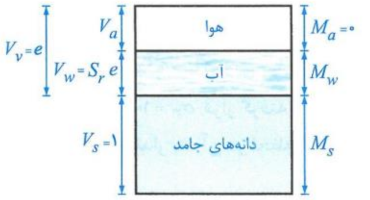
سوالات آزمون دکتری ۹۵

۱- منحنی دانه‌بندی خاکی در شکل نشان داده شده است. کدام گزینه می‌تواند نام‌گذاری خاک در طبقه بندی متحد باشد؟



۱) GP
۲) SM
۳) SP
۴) $SP\text{-}SM$

۲- با فرض $V_s = 1/0$، رابطه میان S_r (درجه اشباع)، e (درجه تخلخل)، ω (درصد رطوبت) و ρ_s (چگالی بخش جامد) کدام‌یک از موارد زیر است؟



۱) $\omega \cdot \rho_s = \rho_w \cdot S_r \cdot e$
۲) $\omega \cdot S_r = \rho_w \cdot \rho_s \cdot e$
۳) $\omega \cdot \rho_w = \rho_s \cdot S_r \cdot e$
۴) $\omega \cdot e = \rho_w \cdot \rho_s \cdot S_r$

۳- برای ساخت یک متر مکعب خاک ریز با نسبت تخلخل ۰/۵، چند متر مکعب از قرضه‌ای با نسبت تخلخل ۱ مورد نیاز است؟

۱) ۰/۶۶ ۲) ۱/۳۳ ۳) ۱/۵ ۴) ۲

۴- به یک خاک ماسه‌ای تمیز برابر ۱۰٪ وزن آن، ریزدانه از جنس لای اضافه نموده و کاملاً مخلوط می‌کنیم. نسبت تخلخل حداکثر و حداقل خاک مخلوط در مقایسه با نسبت تخلخل حداکثر و حداقل خاک ماسه‌ای به‌ترتیب چگونه تغییر می‌کند؟

۱) افزایش - افزایش ۲) افزایش - کاهش ۳) کاهش - کاهش ۴) کاهش - افزایش

۵- در پایین‌دست یک سد بتنی، جریان تراوش آب به سمت بالا رخ می‌دهد. اگر پوکی خاک $n = 0/4$ و چگالی آب $\rho_w = 10\ kg/m^3$ باشد و وضعیت quick sand در پایین‌دست سد مشاهده شود، چگالی دانه‌های جامد خاک (ρ_s) چند کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3) است؟

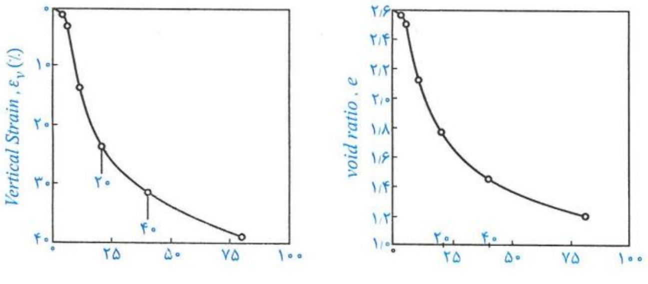
۱) ۱۸/۷
۲) ۲۰/۰
۳) ۲۱/۷
۴) ۲۶/۷

۶- زاویه اصطکاک داخلی مؤثر و مقاومت فشاری محدود نشده برای یک نمونه رس عادی تحکیم یافته به‌ترتیب برابر $\phi' = 30°$ و $q_u = 3/5\ kg/cm^2$ می‌باشد. هنگامی‌که این نمونه در آزمایش UU، تحت تنش همه‌جانبه $2\ kg/cm^2$ قرار می‌گیرد، تنش انحرافی $\Delta\sigma_d$ و فشار آب منفذی u (هر دو برحسب kg/cm^2) در لحظهٔ گسیختگی به‌ترتیب کدام‌اند؟

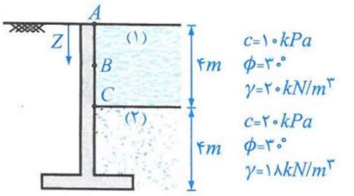
۱) ۲ و ۰/۲۵ ۲) ۲ و ۰/۵۵ ۳) ۳/۵ و ۰/۲۵ ۴) ۳/۵ و ۰/۵۵

۷- نتایج آزمایش تحکیم بر روی یک نمونه خاک رس اشباع برحسب تغییرات درجه تخلخل (e) و تغییرات کرنش قائم (ε_v) در شکل‌های زیر نشان داده شده است. مقادیر ضریب تغییر حجم m_v برحسب kPa^{-1}، ضریب تراکم‌پذیری a_v برحسب kPa^{-1} و شاخص تراکم C_c به‌ترتیب برای این خاک چقدر است؟ محدوده افزایش تنش را ۲۰ تا ۴۰ کیلو پاسکال در نظر بگیرید.

۱) ۰/۰۰۴ و ۰/۰۱۵ و ۱/۰
۲) ۰/۰۴- و ۰/۰۱۵- و ۰/۲۶۶
۳) ۰/۴ و ۰/۱۵ و ۱/۰
۴) ۰/۰۴ و ۰/۱۵ و ۰/۲۶۶



۸- در دیوار حائل شکل زیر، مقدار فشار جانبی محرک خاک در نقطه B $(Z = ۲m)$ چند کیلونیوتن بر متر مربع است؟



۱) صفر
۲) ۱۰
۳) ۲۲
۴) ۵۵

۹- در یک آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی یک نمونه ماسه تمیز اشباع و در فشار همه جانبه kPa ۱۰۰، با رسیدن تنش محوری (σ_1) به kPa ۲۰۰ نمونه به گسیختگی می‌رسد. در صورتی‌که بدانیم $\phi' = ۳۰^\circ$ است، ضریب فشار حفره‌ای A و فشار آب حفره‌ای u در هنگام گسیختگی برحسب kPa به‌ترتیب کدام است؟

۱) $\frac{۱}{۲}$ و ۵۰-
۲) $\frac{۱}{۴}$ و ۰
۳) $\frac{۱}{۲}$ و ۵۰
۴) $\frac{۱}{۴}$ و ۵۰

۱۰- دو نمونه از یک خاک رس با درجه اشباع $S_r = ۸۰\%$ تحت آزمایش سه محوری UU قرار دارند. نمونه اول تحت تنش همه جانبه $\sigma_3 = ۱۰۰\ kPa$ قرار گرفته و در تنش $\sigma_1 = ۲۰۰\ kPa$ گسیخته می‌شود. در صورتی‌که نمونه دوم تحت تنش همه جانبه $\sigma_3 = ۲۰۰\ kPa$ قرار گیرد، مقدار σ_1 آن در لحظه گسیختگی چند کیلوپاسکال است؟

۱) $\sigma_1 < ۲۰۰$
۲) $۲۰۰ \le \sigma_1 < ۲۵۰$
۳) $۲۵۰ < \sigma_1 \le ۳۰۰$
۴) $۳۰۰ < \sigma_1$

پاسخ سوالات آزمون دکتری ۹۵

۱- (۲)

با توجه به منحنی دانه‌بندی داده شده در صورت سؤال، درصد خاک عبوری از الک‌های شمارهٔ ۲۰۰ و ۴ به شرح زیر است:

$F_{۲۰۰} = ۲۵\%$, $F_۴ = ۸۵\%$

چون $F_{۲۰۰} = ۲۵\% < ۵۰\%$ است، بنابراین خاک مورد نظر درشت‌دانه بوده و حرف اول آن G یا S است که البته این موضوع را در گزینه‌ها نیز می‌توانیم مشاهده کنیم. حال درصد شن و ماسه را به‌صورت زیر محاسبه کرده و با هم مقایسه می‌کنیم:

$NO۴$ — شن — = درصد مانده روی الک ۴ = ۱۵٪ = ۸۵ − ۱۰۰

$NO۲۰۰$ — ماسه — = درصد شن − درصد ریزدانه − ۱۰۰ = ۶۰٪ = ۲۵ − ۱۵ − ۱۰۰

Pan — ریزدانه — = درصد عبوری از الک ۲۰۰ = ۲۵٪

همانطورکه ملاحظه می‌کنید درصد ماسه (۶۰٪) از درصد شن (۱۵٪) بیشتر بوده و حرف اول خاک S می‌باشد. از طرفی درصد عبوری از الک ۲۰۰ (۲۵٪) بیشتر از ۱۲٪ است و حرف دوم خاک به‌صورت C یا M خواهد بود که با توجه به گزینه‌ها نام کامل خاک به‌صورت SM انتخاب می‌شود.

تذکر: برای یافتن نام کامل خاک در این تست، لازم است تا اطلاعات مربوط به حدود اتربرگ بخش ریزدانهٔ خاک را داشته باشیم تا از طریق آن، C یا M بودن حرف دوم خاک را معلوم کنیم.

۲- (۱)

با نوشتن رابطهٔ پرکاربرد وزنی و حجمی که ارتباط بین اجزاء مختلف خاک را بیان می‌کند (فصل اول کتاب)، خواهیم داشت:

$$\omega G_s = S_r e \quad , \quad G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \Rightarrow \omega \times \frac{\rho_s}{\rho_w} = S_r\, \rho_s \Rightarrow \omega\, \rho_s = \rho_w S_r\, e$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید، بدون فرض $V_s = ۱$ هم عبارت درست که گزینهٔ (۱) است، به‌دست می‌آید.

۳- (۲)

با توجه به مطالب خوانده شده در بحث تراکم خاک قرضه (فصل اول کتاب)، می‌نویسیم:

$$\frac{V_۲}{V_۱} = \frac{۱+e_۲}{۱+e_۱} \Rightarrow \frac{۱}{V_۱} = \frac{۱+۰/۵}{۱+۱} \Rightarrow V_۱ = ۱/۳۳\ m^۳$$

۴- (۳)

با اضافه کردن لای به خاک ماسه‌ای تمیز، خلل و فرج آن پر شده و در هر صورت نسبت تخلخل خاک کاهش می‌یابد.

۵- (۴)

در وضعیت $quick\ sand$ یا همان جوشش خاک ماسه‌ای، داریم:

$$i = i_{cr} = \frac{G_s - ۱}{۱+e} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

اما از آنجائیکه در خاک‌های ماسه‌ای $\gamma_{sat} \simeq ۲\gamma_w$ است، می‌توان گفت:

$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} \simeq \frac{۲\gamma_w - \gamma_w}{\gamma_w} = ۱$$

از طرفی مقدار نسبت تخلخل خاک، نیز به‌سادگی به‌صورت زیر قابل تعیین است:

$$e = \frac{n}{۱-n} = \frac{۰/۴}{۱-۰/۴} = \frac{۲}{۳}$$

در ادامه با جایگذاری مقدار e در رابطهٔ i_{cr}، مقدار G_s و سپس ρ_s این خاک به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{G_s - ۱}{۱+\frac{۲}{۳}} = ۱ \Rightarrow G_s = \frac{۸}{۳} = ۲/۶۷$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \Rightarrow ۲/۶۷ = \frac{\rho_s}{۱۰} \Rightarrow \rho_s = ۲۶/۷\ kg/m^۳$$

۶- (۳)

در حل این تست با فرض اشباع بودن خاک رس و براساس مطالب خوانده شده در بحث آزمایش‌های UU و UC (فصل هشتم کتاب)، می‌توان نوشت:

الف) حالت حاکمیت تنش کل در آزمایش UU

$$\phi = ۰ \quad , \quad c = c_u = \frac{۱}{۲} q_u = \frac{۱}{۲} \times ۳/۵ = ۱/۷۵\ kg/cm^۲$$

$$\Delta\sigma_d = ۲c_u = q_u = ۳/۵\ kg/cm^۲$$

ب) حالت حاکمیت تنش مؤثر در آزمایش UU

$$\phi' = ۳۰^\circ \quad , \quad c' = ۰ \ \ (NC \text{ رس}) \quad , \quad \Delta\sigma_d = q_u = ۳/۵\ kg/cm^۲$$

$$(\sigma_۱ - u_f) = (\sigma_۳ - u_f)\ tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) + ۲c' tan(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow (۲ + ۳/۵ - u_f) = (۲ - u_f) \times tan^۲(۴۵ + \frac{۳۰}{۲}) + ۰ \Rightarrow u_f = ۰/۲۵\ kg/cm^۲$$

۷- (۱)

با نوشتن روابط مربوط به ضرایب تراکم‌پذیری خاک رس خواهیم داشت:

$$m_v = \frac{\frac{\Delta V}{V_۰}}{\Delta\sigma'} = \frac{\frac{V_۱ - V_۲}{V_۰}}{\sigma'_۲ - \sigma'_۱} = \frac{|\Delta\varepsilon_v|}{\sigma'_۲ - \sigma'_۱} = \frac{۰/۳۲ - ۰/۲۴}{۴۰ - ۲۰} = ۰/۰۰۴\ kPa^{-۱}$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta\sigma'} = \frac{e_۱ - e_۲}{\sigma'_۲ - \sigma'_۱} = \frac{۱/۸ - ۱/۵}{۴۰ - ۲۰} = ۰/۰۱۵\ kPa^{-۱} \quad , \quad C_c = \frac{\Delta e}{log(\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱})} = \frac{e_۱ - e_۲}{log(\frac{\sigma'_۲}{\sigma'_۱})} = \frac{۱/۸ - ۱/۵}{log(\frac{۴۰}{۲۰})} = \frac{۰/۳}{log ۲} \simeq ۱$$

تذکر: در حل این سؤال می‌توانستیم پس از محاسبهٔ m_v، مقدار a_v را به‌صورت زیر هم بیابیم:

$$m_v = \frac{a_v}{۱ + e_۰} \Rightarrow ۰/۰۰۴ = \frac{a_v}{۱ + ۲/۶} \Rightarrow a_v \simeq ۰/۰۱۵$$

نکته قابل توجه در حل فوق، مقدار $e_۰$ است که با توجه به نمودار داده شده، مقدار آن را برابر ۲/۶ در نظر گرفتیم و نه برابر $e_۱ = ۱/۸$. توجه کنید که در حالت کلی $e_۰$ با $e_۱$ فرق دارد به این ترتیب که $e_۰$ مربوط به ابتدای آزمایش است ولی $e_۱$ مربوط به ابتدای محدودهٔ موردنظر می‌باشد. لازم به ذکر است که اگر محدودهٔ تغییرات تنش از ابتدای آزمایش مدنظر باشد، در آن‌صورت $e_۰ = e_۱$ خواهد شد.

۸- (۱)

در این مسأله با توجه به ایجاد حالت محرک از یک طرف و چسبنده بودن خاک لایهٔ بالایی از طرف دیگر، شاهد وقوع ترک کششی در این لایه خواهیم بود که عمق آن برابر است با:

$$Z_{cr} = \frac{۲c}{\gamma\sqrt{k_a}} = \frac{۲ \times ۱۰}{۱۵ \times tan(۴۵ - \frac{۳۰}{۲})} = ۲/۳\ m$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید، نقطهٔ B $(Z = ۲m)$ در ناحیهٔ وقوع ترک کششی (زون کششی) قرار دارد و فشار محرک در این نقطه برابر صفر خواهد بود (زیرا با وقوع ترک تماس خاک و دیوار از بین می‌رود).

تذکر: این تست مربوط به فصل اول کتاب پی‌سازی است و از این جهت در آزمون دکتری مطرح شده است که این فصل (فشار جانبی خاک و دیوارهای حائل)، معمولاً به‌صورت مختصرتر (نسبت به درس پی‌سازی) در سرفصل‌های درس مکانیک خاک مطرح می‌گردد.

۹- (۳)

آزمایش موردنظر در این سؤال یک آزمایش سه محوری از نوع CU است که در حالت حاکمیت تنش مؤثر، رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی برای آن به‌صورت زیر نوشته شده و در ادامه مقدار u_f (فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی) به‌دست می‌آید:

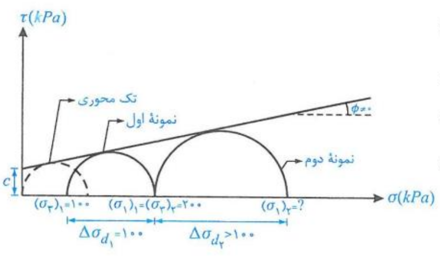
$$(\sigma_۱ - u_f) = (\sigma_۳ - u_f)\ tan^۲(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) + \underset{\text{(ماسه) } ۰}{۲c'} tan(۴۵ + \frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow (۲۰۰ - u_f) = (۱۰۰ - u_f) \times tan^۲(۴۵ + \frac{۳۰}{۲}) + ۰ \Rightarrow u_f = ۵۰\ kPa$$

همچنین برای محاسبه پارامتر A اسکمپتون، داریم:

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} = \frac{u_f}{\sigma_۱ - \sigma_۳} = \frac{۵۰}{(۲۰۰ - ۱۰۰)} = \frac{۱}{۲}$$

۱۰- (۴)

در بحث رفتار خاک رس غیراشباع در آزمایش UU (فصل هشتم کتاب مکانیک خاک) دیدیم که زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک رس غیراشباع به هنگام این آزمایش (آزمایش UU) مخالف صفر به‌دست می‌آید، به عبارت دیگر خط گسیختگی مور - کولمب موازی محور افقی σ نخواهد بود. این موضوع با توجه به اطلاعات داده شده در این سؤال به‌صورت شکل مقابل خواهد بود:



بنابراین با توجه به شکل فوق واضح است که $\sigma_۱$ در نمونهٔ دوم برابر است با:

$$(\sigma_۱)_۲ = (\sigma_۳)_۲ + \Delta\sigma_{d_۲} = ۲۰۰ + ۱۰۰ \text{ مقداری بزرگتر از } > ۳۰۰\ kPa$$

سوالات آزمون سراسری ۹۵

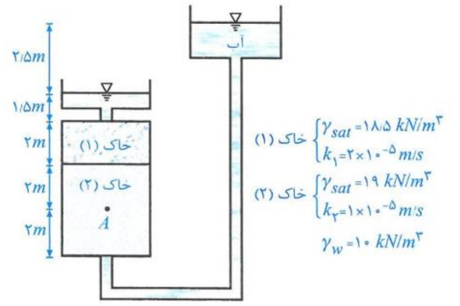
۱- به ۴ کیلوگرم از خاکی که مطابق طبقه‌بندی متحد SP نام‌گذاری شده است، ۲ کیلوگرم خاک با قطر ذرات کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر و با حد روانی و خمیری برابر ۶۰ و ۴۰ اضافه می‌کنیم. نام خاک حاصل مطابق طبقه‌بندی متحد کدام است؟

۱) ML ۲) SC ۳) SM ۴) $CL-ML$

۲- در یک نمونه خاک ماسه‌ای اشباع مقدار رطوبت برابر با $\omega = ۲۰\%$ و پوکی خاک ۰/۳۵ می‌باشد. وزن مخصوص خشک خاک γ_d چند کیلونیوتن بر متر مکعب (kN/m^3) است؟ $(\gamma_w = ۱۰\ kN/m^3)$

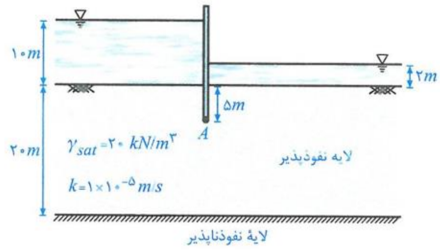
۱) ۱۳ ۲) ۱۶ ۳) ۱۷/۵ ۴) ۲۱/۵

۳- با توجه به شکل داده شده، مقادیر تنش مؤثر (σ'_A) و فشار آب منفذی (u_A) در نقطه A به‌ترتیب (از راست به چپ) چند کیلوپاسکال است؟



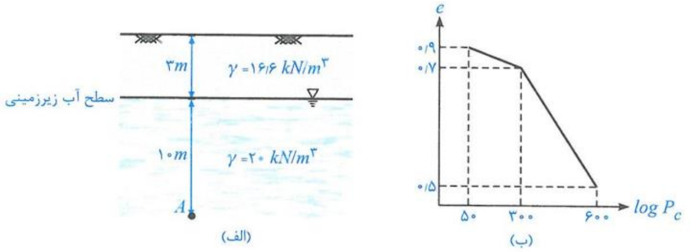
۱) ۲۰ و ۵۵
۲) ۲۰ و ۷۰
۳) ۳۵ و ۵۵
۴) ۳۵ و ۷۰

۴- برای شکل داده شده، ارتفاع آب در سمت چپ سپری ۱۰ متر و در سمت راست آن ۲ متر است. فشار آب در خاکی که در نقطهٔ A زیر سپری قرار دارد چند کیلوپاسکال است؟ $(\gamma_w = ۱۰\ kN/m^3)$



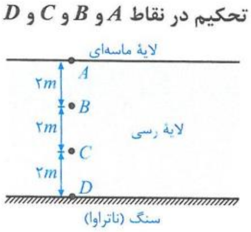
۱) ۱۵۰
۲) ۱۱۰
۳) ۷۰
۴) ۶۰

۵- در آزمایش ادومتر برای نمونه خاک رسی که از نقطهٔ A شکل (الف) به‌دست آمده، منحنی تحکیم به‌صورت شکل (ب) حاصل شده است. برای این نمونه خاک رسی مقدار نسبت پیش تحکیمی (OCR) برابر چه مقداری است؟ (فرض کنید $\gamma_w = ۱۰\ kN/m^3$)



۱) ۱
۲) ۲
۳) ۳
۴) ۴

۶- اگر برای لایه رسی در شکل داده شده، درجه تحکیم متوسط برابر ۵۰ درصد باشد، کدام گزینه در مورد درجه تحکیم در نقاط A و B و C و D صحیح است؟

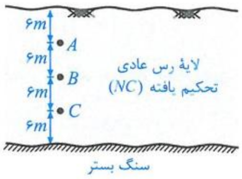


۱) $U_A = ۵۰\%$ ، $U_A = U_D$ ، $U_B = U_C$
۲) $U_A = ۵۰\%$ ، $U_B > U_C > U_D$
۳) $U_A = ۱۰۰\%$ ، $U_B < U_C < U_D$
۴) $U_A = ۱۰۰\%$ ، $U_B > U_C > U_D$

۷- مقدار اضافه فشار آب منفذی در اثر اعمال سریع تنش‌های قائم $\Delta\sigma_1 = 250\ kPa$ و تنش افقی $\Delta\sigma_3 = 50\ kPa$ بر یک لایه رسی اشــباع، در دو حالت تحکیم عادی NC و فوق تحکیم OC با استفاده از ضرایب فشار منفذی اسکمپتون به‌ترتیب چند kPa است و در هر حالت (به‌ترتیب NC و OC)، خاک تحت برش چه رفتاری از خود نشان می‌دهد؟ ضرایب A را در حد گسیختگی به‌ترتیب برای حالـت NC و OC برابـر ۰/۵ + و ۰/۵ - در نظر بگیرید.

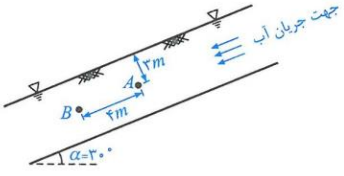
۱) ۷۵ و ۲۵- حالت اتساع و کاهش حجم
۲) ۱۵۰ و ۵۰- کاهش حجم و حالت اتساع
۳) ۱۵۰ و ۲۵- حالت اتساع و کاهش حجم
۴) ۷۵ و ۵۰- کاهش حجم و حالت اتساع

۸- بر روی نمونه‌های خاک رس اشباع انتخاب شده از نقطه‌های A و B و C مطابق شکل داده شده، آزمایش سه محوری تحکیم نیافتــه زهکــشی نشده $(U.U)$ انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌ها با کدام گزینه سازگار است؟



۱) $c_{u,A} < c_{u,B} < c_{u,C}$
۲) $c_{u,A} > c_{u,B} > c_{u,C}$
۳) $c_{u,A} = c_{u,B} = c_{u,C}$
۴) $\phi_{u,A} < \phi_{u,B} < \phi_{u,C}$

۹- در شیب خاکی شکل داده شده، تراوش به موازات سطح شیب در جریان است. اگر دو پیزومتر در نقاط A و B قرار داده شود، اختلاف تراز آب در بین این دو پیزومتر چند متر است؟



۱) صفر
۲) ۴
۳) $3\sin 30^\circ$
۴) $4\sin 30^\circ$

پاسخ سوالات آزمون سراسری ۹۵

۱- (۳)

با توجه به اینکه نام خاک اولیهٔ SP می‌باشد، می‌توان گفت که درصد ریزدانهٔ آن کمتر از ٪۵ بوده و قابل صرف‌نظر کردن است. حال اگر ۲ کیلوگرم خاک ریزدانه (خاک با قطر ذرات کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) به خاک اولیه اضافه کنیم، در آن‌صورت برای خاک جدید می‌توان نوشت:

درصد خاک عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ = درصد ریزدانهٔ خاک = $(\frac{2}{2+4})\times 100 \simeq 33\%$

در این حالت درصد عبوری از الک شمارهٔ ۲۰۰ (درصد ریزدانه) کمتر از ٪۵۰ است، بنابراین طبق مطالب گفته شده در قسمت سوم از فصل دوم کتاب، خاک جدید همچنان درشت‌دانه (ماسه) بوده و حرف اول آن (S) است. از طرف دیگر درصد ریزدانهٔ خاک از ٪۱۲ بیشتر است، بنابراین حرف دوم خاک به‌صورت M یا C خواهد بود که در ادامه آن را به‌صورت زیر تعیین می‌کنیم:

$$\begin{cases} PI = LL - PL = 60 - 40 = 20 \\ PI_A = 0/73(LL-20) = 0/73\times(60-20) = 29/2 \end{cases} \Rightarrow PI < PI_A \Rightarrow$$ خاک مورد نظر زیر خط A بوده و حرف دوم M است

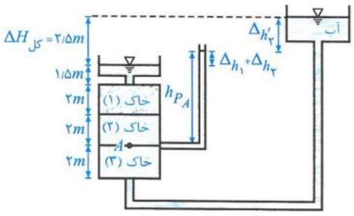
پس نام کامل خاک $\boxed{SM}$ است (یعنی ماسهٔ لای‌دار) و گزینهٔ (۳) درست می‌باشد.

۲- (۳)

با استفاده از روابط وزنی و حجمی گفته شده در فصل اول، خواهیم داشت:

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0/35}{1-0/35} = \frac{7}{13} \quad , \quad \omega G_s = S_r e \Rightarrow 0/2\times G_s = 1\times\frac{7}{13} \Rightarrow G_s = \frac{35}{13} \quad , \quad \gamma_d = \frac{G_s\gamma_w}{1+e} = \frac{\frac{35}{13}\times 10}{1+\frac{7}{13}} = 17/5\ kN/m^3$$

۳- (۲)



برای حل این سؤال باید از نکات و فرمول‌های مربوط به جریان آب در خاک‌های با لایه‌بندی سری که در فصل چهارم کتاب به آن اشاره شده است، استفاده کنیم. بدین منظور ابتدا بهتر است تا شکل مسأله را به‌صورت زیر در نظر بگیرید:

همانطورکه ملاحظه می‌کنید برای تعیین فشار آب منفذی در نقطهٔ A (u_A) لازم است تا $\Delta h_{2'}$ و سپس h_{P_A} را بیابیم، از این‌رو می‌نویسیم:

$$\text{نسبت } \frac{L}{Ak} \begin{cases} \text{لایه (1)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_1 = \frac{2}{A\times 2k} = \frac{1}{Ak} = x \\ \text{لایه (2)} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_2 = \frac{2}{A\times k} = 2(\frac{1}{Ak}) = 2x \Rightarrow \Delta h_{2'} = (\frac{2x}{x+2x+2x})\Delta H_{کل} = \frac{2}{5}\times 2/5 = 1m \\ \text{لایه (2')} \Rightarrow (\frac{L}{Ak})_{2'} = \frac{2}{A\times k} = 2(\frac{1}{Ak}) = 2x \end{cases}$$

$$h_{P_A} = 2+2+1/5+2/5-1 = 7m \Rightarrow u_A = h_{P_A}\gamma_w = 7\times 10 = 70\ kPa$$

در ادامه نیز با استفاده از اصل تنش مؤثر ترزاقی، تنش مؤثر نقطهٔ A را به‌دست می‌آوریم:

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A = (1/5\times 10 + 2\times 18/5 + 2\times 19) - (70) = 20\ kPa$$

۴- (۲)

برای حل این مسأله (که نظیر آن را به دفعات در تمرین‌ها و تست‌های فصل پنجم مشاهده کرده‌اید)، نقطهٔ B را روی سطح خاک پایین دست در نظر گرفته و معادلهٔ برنولی را بین نقاط A و B می‌نویسیم:

$$H_A = H_B + \Delta H_{AB} \Rightarrow \frac{u_A}{\gamma_w} + h_{z_A} = \frac{u_B}{\gamma_w} + h_{z_B} + \Delta H_{AB}$$

قبل از جایگذاری اطلاعات مسأله در معادله برنولی به دو موضوع توجه می‌کنیم:

۱- ΔH_{AB} افت انرژی از A تا B است که دقیقاً برابر نصف افت انرژی کلی است، زیرا مسیر پیموده شده توسط یک قطره آب از بالا دست تا نقطهٔ A برابر مسیر پیموده شده از نقطهٔ A تا پایین‌دست (نقطهٔ B) می‌باشد.

۲- سطح خاک را به‌عنوان تراز مبنا انتخاب می‌کنیم که در این‌صورت $h_{z_A} = -5\ m$ و $h_{z_B} = 0$ خواهد شد.

حال با دانستن دو موضوع فوق، می‌نویسیم:

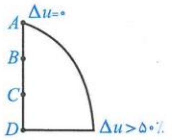
$$\frac{u_A}{10} + (-5) = 2 + 0 + \frac{1}{2}\times(10-2) \Rightarrow u_A = 110\ kPa$$

۵- (۲)

در این مسأله هدف آن است که با استفاده از آزمایش تحکیم یک بعدی (ادومتری)، نسبت پیش تحکیمی خاک در نقطهٔ A تعیین گردد. برای ایـن منظور، با توجه به تعاریف ارائه شده در خصوص مفهوم پیش تحکیمی خاک که در قسمت اول از فصل هفتم کتاب آورده شده است، می‌نویسیم:

$$\begin{cases} OCR = \dfrac{\sigma'_c}{\sigma'_\circ} \\ \sigma'_c = ۳۰۰\ kPa\ \text{(نقطه شکست نمودار تحکیم)} \\ \sigma'_\circ = \sum \gamma' z = ۱۶/۶ \times ۳ + (۲۰-۱۰) \times ۱۰ = ۱۵۰\ kPa \end{cases} \Rightarrow OCR = \frac{۳۰۰}{۱۵۰} = ۲$$

۶- (۴)



برای حل این سؤال کافیست به صفحهٔ (۳۰۹) در فصل هفتم کتاب مراجعه کرده و به مطالب گفتـه شـده در قـسمت بررسی یک مفهوم پرتکرار دقت کنید. با توجه به مرزهای قرار گرفته در بالا و پایین لایهٔ رسی (بالا، ماسـهٔ نفوذپـذیر و پایین، سنگ)، نمودار توزیع اضافه فشار آب حفره‌ای در این لایه (در لحظهٔ مورد نظر که درجه تحکـیم متوسـط برابـر ۵۰٪ است)، به‌صورت مقابل خواهد بود و در نتیجه می‌توان نوشت: $\Delta u_A = ۰ \quad , \quad \Delta u_D > \Delta u_C > \Delta u_B$

از طرفی می‌دانیم هر چقدر پیشروی تحکیم (که نماد آن درجه تحکیم است) بیشتر باشد، اضافه فـشار آب حفـره‌ای کمتـر خواهـد بـود. بـا ایـن توضیح و در نظر گرفتن مطالب فوق می‌توان به‌صورت زیر در مورد درجهٔ تحکیم (U) نقاط مختلف لایهٔ رسی در لحظهٔ مورد نظر اظهارنظر کرد:

$U_A = ۱۰۰٪ \quad , \quad U_D < U_C < U_B$

۷- (۲)

این یک سؤال بسیار ساده می‌باشد که برای حل آن فقط کافی است تا رابطهٔ اسکمپتون در تعیین اضافه فـشار آب حفـره‌ای را (صـفحهٔ ۴۱۴ کتاب) به خاطر داشته باشید:

$$\Delta u = B\left[\Delta\sigma_۳ + A(\Delta\sigma_۱ - \Delta\sigma_۳)\right] \qquad \text{(رابطهٔ اسکمپتون)}$$

در ادامه با کمک اطلاعات داده شده در صورت سؤال، می‌نویسیم:

الف) رس NC

خاک اشباع

$$\Delta u = \boxed{۱} \times \left[۵۰ + ۰/۵ \times (۲۵۰ - ۵۰)\right] = ۱۵۰\ kPa$$

ب) رس OC

خاک اشباع

$$\Delta u = \boxed{۱} \times \left[۵۰ - ۰/۵ \times (۲۵۰ - ۵۰)\right] = -۵۰\ kPa$$

لازم به ذکر است که در آزمایش CU و در مرحلهٔ دوم آن (مرحلهٔ برش)، به هنگام گسیختگی، خاک‌های رسی NC و OC به‌ترتیب با کاهش حجم و افزایش حجم (اتساع) مواجه می‌شوند.

۸- (۱)

طبق رابطهٔ اسکمپتون که در فصل هشتم کتاب و صفحهٔ (۴۰۹) نیز ذکر شده است، هر چقدر تنش مؤثر وارد بر نمونه بزرگتر باشد، مقاومـت برشی زهکشی نشدهٔ آن نیز (c_u) بزرگتر خواهد بود:

$$\left(\frac{c_u}{\sigma'_z}\right)_{NC} = \boxed{۰/۱۱ + ۰/۰۰۳۷\,PI} \Rightarrow c_u \propto \sigma'_z$$

برای یک خاک مشخص (PI ثابت)، این عبارت مقداری ثابت است.

از بحث فوق و رابطهٔ اسکمپتون، چنین استنباط می‌شود که هر چقدر نمونه در عمق بیشتری از خاک قرار گرفته باشد، چون σ'_z آن بزرگتـر است، بنابراین مقاومت برشی زهکشی نشدهٔ بزرگتری هم خواهد داشت. از این‌رو می‌توان گفت:

$$c_{u_C} > c_{u_B} > c_{u_A} \quad , \quad \phi_{u_A} = \phi_{u_B} = \phi_{u_C} = ۰ \quad \text{(خاک رس اشباع است)}$$

۹- (۴)

در این سؤال که مشابه تمرین (۶) از فصل چهارم کتاب است، اختلاف تراز پیزومتری بین دو نقطه یا همان ΔH_{AB} خواسته شده اسـت کـه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{cases} \Delta H_{AB} = \dfrac{\Delta u_{AB}}{\gamma_w} + \Delta h_{z_{AB}} \\ \dfrac{\Delta u_{AB}}{\gamma_w} = ۰ \quad (h_{P_A} = h_{P_B} = ۳\cos ۳۰^\circ = ۱/۵\sqrt{۳}\ m) \\ \Delta h_{z_{AB}} = L \sin\alpha = ۴ \sin ۳۰^\circ = ۲m \end{cases} \Rightarrow \Delta H_{AB} = ۰ + ۴\sin ۳۰^\circ = ۴\sin ۳۰^\circ = ۲\ m$$

سوالات آزمون سراسری ۹۶

۱- در یک نهشتهٔ خاک طبیعی، درصد رطوبت ۱۵ درصد، چگالی ویژه ۲/۶ و نسبت تخلخل (e) برابر با ۰/۵ است. درجه اشباع این خاک چند درصد است؟

۱) ۵۲ ۲) ۷۸ ۳) ۹۰ ۴) ۱۰۰

۲- تعریف اندیس روانی (*Liquidity Index*) کدام است؟

۱) حد روانی منهای درصد رطوبت طبیعی خاک تقسیم بر اندیس خمیری
۲) حد خمیری منهای درصد رطوبت طبیعی خاک تقسیم بر اندیس خمیری
۳) درصد رطوبت طبیعی منهای حد خمیری خاک تقسیم بر حد روانی
۴) درصد رطوبت طبیعی منهای حد خمیری خاک تقسیم بر اندیس خمیری

۳- برای نام‌گذاری یک نمونه خاک اطلاعات زیر به‌دست آمده است:

درصد رد شده از الک شماره ۴	۵۵٪
درصد رد شده از الک شماره ۲۰۰	۱۵٪
حد خمیری *PL*	۲۰
حد روانی *LL*	۳۰

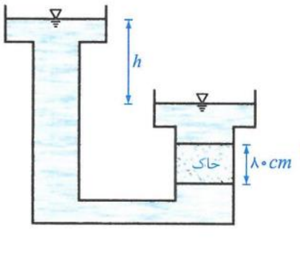
نام این خاک در سیستم طبقه‌بندی متحد *Unified soil classification system* کدام است؟

۱) *GC* ۲) *SC* ۳) *GC-GM* ۴) *SC-SM*

۴- خاکی با درصد رطوبت ۱۰ درصد و وزن مخصوص کل ۱۶/۵ کیلونیوتن بر متر مکعب موجود است. چنانچه حجم این خاک در عملیات تراکم ۱۰ درصد کاهش یابد، وزن مخصوص خشک خاک متراکم شده چند کیلونیوتن بر مترمکعب است؟

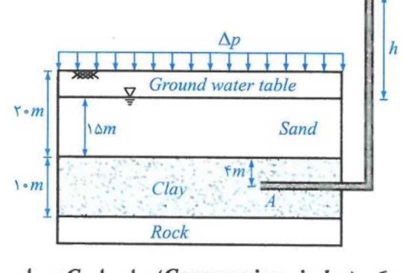
۱) ۱۸/۷ ۲) ۱۸/۳ ۳) ۱۶/۷ ۴) ۱۶/۵

۵- حداکثر مقدار h برحسب متر چقدر باشد تا خاک دچار جوشش نگردد؟



۱) ۰/۴
۲) ۰/۶
۳) ۰/۷
۴) ۰/۸

۶- سربار گستردهٔ Δp برابر با ۱۰۰ کیلوپاسکال در سطح زمین اعمال می‌شود. چنانچه مقدار h در پیزومتر قرار داده شده در نقطه A در لایه رسی برابر با ۴ متر شود، درجهٔ تحکیم در نقطهٔ A چند درصد است؟ وزن مخصوص آب را $10 kN/m^3$ در نظر بگیرید.



۱) ۸۰
۲) ۶۰
۳) ۵۰
۴) ۴۰

۷- در آزمایش تحکیم روی نمونه‌ای دست نخورده از یک خاک رسی در آزمایشگاه، اندیس فشردگی (*Compression index*) برابر با C_{c_1} برای این خاک اندازه‌گیری شده است. همین خاک به‌صورت دست‌خورده تحت آزمایش تحکیم قرار گرفته است و مقدار اندیس فشردگی C_{c_2} برای این خاک اندازه‌گیری شده است. اگر C_{c_3} اندیس فشردگی این خاک در محل و به‌صورت بکر باشد، کدام‌یک از روابط زیر صحیح است؟

۱) $C_{c_1} = C_{c_2} = C_{c_3}$ ۲) $C_{c_2} > C_{c_1} > C_{c_3}$ ۳) $C_{c_2} > C_{c_3} > C_{c_1}$ ۴) $C_{c_3} > C_{c_1} > C_{c_2}$

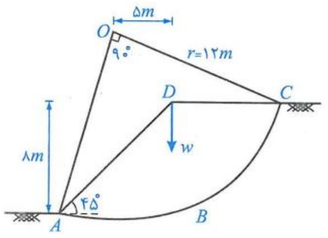
۸- کدام‌یک از گزینه‌های زیر در ارتباط با مدت زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش سه محوری بر روی یک خاک رسی معین صادق است؟

۱) $UU < CU < CD$ ۲) $UU > CU > CD$ ۳) $UU < CD < CU$ ۴) $CD > UU > CU$

۹- در آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده بر روی یک خاک ماسه‌ای تمیز، نمونه در فشار همه جانبه $\sigma_3 = ۱۰۰ kPa$ و در تنش تفاضلی ۲۰۰ کیلوپاسکال گسیخته می‌شود. چنانچه بر روی همین خاک آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده‌ای انجام شود که در این آزمایش $\sigma_3 = ۱۵۰ kPa$ بوده و نمونه با همان تنش تفاضلی ۲۰۰ کیلوپاسکال گسیخته شود، کدام‌یک از موارد زیر درباره مقدار فشار آب منفذی (u) در این آزمایش در لحظهٔ گسیختگی نمونه صحیح است؟

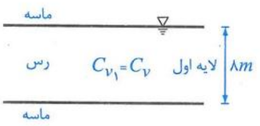
۱) $u = ۰$ ۲) $۲۰ kPa < u < ۴۰ kPa$ ۳) $۴۰ kPa < u < ۶۰ kPa$ ۴) $۸۰ kPa > u > ۶۰ kPa$

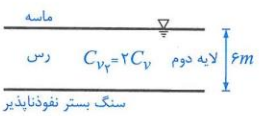
۱۰- برای شیروانی شکل زیر با ارتفاع ۸ متر و زاویه شیب ۴۵° که در یک خاک رسی اشباع ایجاد شده است، ضریب اطمینان پایداری شیب برای سطح گسیختگی نشان داده شده کدام است؟ مقاومت برشی خاک $c_u = ۶۰ kPa$ و $\phi_u = ۰$ و مقدار $W = ۱۲۰۰ kN/m$ می‌باشد.



۱) ۰/۹
۲) ۱/۵۵
۳) ۲/۲۶
۴) ۲/۴۵

۱۱- دو لایه خاک رس اشباع مطابق شکل موردنظر است. در اثر بار وارده لایه اول در مدت ۱۰ سال ۳۰ درصد نشست تحکیمی دارد. در صورتی‌که ضریب تحکیم لایه دوم دو برابر ضریب تحکیم لایه اول باشد، در اثر بارگذاری لایه دوم پس از چند سال ۴۰٪ نشست تحکیمی خواهد داشت؟





۱) ۴۰
۲) ۲۰
۳) ۱۰
۴) ۵

۱۲- نوعی خاک رس عادی تحکیم یافته دارای حد روانی ۴۰ است. ضریب تراکم‌پذیری خاک (a_v) در اثر افزایش تنش مؤثر از $۱۰۰ kPa$ به $۱۰۰۰ kPa$ چقدر است؟ $C_c = ۰/۰۰۹ (LL - ۱۰)$

۱) ۰/۰۰۰۳ ۲) ۰/۰۰۳ ۳) ۰/۰۳ ۴) ۰/۳

پاسخ سوالات آزمون سراسری ۹۶

۱- (۲)

با در اختیار داشتن رطوبت، چگالی ویژه و نسبت تخلخل خاک، به‌صورت زیر و با کمک رابطهٔ ارائه شده در بخش (B-۴) از فصل اول کتاب (صفحهٔ ۲۳) می‌توان درجه اشباع را به‌دست آورد:

$$\omega G_s = S_r e \Rightarrow ۰/۱۵ \times ۲/۶ = S_r \times ۰/۵ \Rightarrow S_r = ۰/۷۸ = ۷۸\%$$

۲- (۴)

با توجه به تعریف اندیس روانی (شاخص روانی) که در بخش (B-۲) از فصل دوم کتاب (صفحهٔ ۶۹) با آن آشنا شدید، خواهیم داشت:

$$LI = \frac{\omega - PL}{PI} = \frac{\text{حد خمیری} - \text{درصد رطوبت طبیعی}}{\text{اندیس خمیری}}$$

۳- (۱)

این سؤال مشابه تست (۱۷) از فصل دوم کتاب است. بنابراین به طریق مشابه و با توجه به اطلاعات داده‌شده در صورت سؤال در مورد الک‌ها و نیز مقادیر حد خمیری و حد روانی، خواهیم داشت:

$NO۴$	۴۵٪	شن
$NO۲۰۰$	۴۰٪	ماسه
ظرف	۱۵٪	ریزدانه

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{درشت‌دانه} = ۸۵\% > \text{ریزدانه} = ۱۵\% \Rightarrow \text{حرف اول خاک } S \text{ یا } G \\ \text{شن} = ۴۵\% > \text{ماسه} = ۴۰\% \Rightarrow \text{حرف اول خاک } G \\ PI_{\text{موجود}} = ۳۰ - ۲۰ = ۱۰ > PI_A = ۰/۷۳(LL - PL) = ۰/۷۳ \times (۳۰ - ۲۰) = ۷/۳ \Rightarrow \text{حرف دوم خاک } C \end{cases}$$

بنابراین نام کامل خاک $\boxed{GC}$ خواهد بود.

۴- (۳)

همانطورکه در بخش (C-۲) از فصل اول کتاب دیدید (مفاهیم اولیه تراکم خاک قرضه)، در حین عملیات تراکم خاک، W_s ثابت است. پس می‌توان نوشت:

$$W_{s_{\text{خاک قرضه}}} = W_{s_{\text{خاک اجرایی}}} \Rightarrow \gamma_{d_۱} V_۱ = \gamma_{d_۲} V_۲ \Rightarrow \frac{\gamma_{d_۲}}{\gamma_{d_۱}} = \frac{V_۱}{V_۲}$$

همچنین می‌دانیم‌که $\gamma_d = \frac{\gamma}{۱+\omega}$ است، بنابراین $\gamma_{d_۱} = \frac{۱۶/۵}{۱+۰/۱} = ۱۵ kN/m^۳$ خواهد بود و در نهایت خواهیم داشت:

$$\frac{\gamma_{d_۲}}{۱۵} = \frac{V_۱}{۰/۹ V_۱} \Rightarrow \gamma_{d_۲} = ۱۶/۷ kN/m^۳$$

۵- (۳)

در قسمت پنجم از فصل پنجم کتاب (بحث جوشش در خاک) دیدیم، شرط جوشش آن است که $i = i_{cr}$ شود. بنابراین می‌نویسیم:

$$\begin{cases} i = i_{cr} \Rightarrow \frac{\Delta H}{L} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - ۱}{۱+e} \\ \omega G_s = S_r e \Rightarrow ۰/۲۵ \times ۲/۴ = ۱ \times e \Rightarrow e = ۰/۶ \end{cases} \Rightarrow \frac{h}{۰/۸} = \frac{۲/۴ - ۱}{۱ + ۰/۶} \Rightarrow h = ۰/۷ m$$

۶- (۲)

برای یک نقطه مانند A، در هر لحظه اختلاف تراز پیزومتر نسبت به تراز آب زیرزمینی (h)، متناظر با Δu_z نقطه در آن لحظه می‌باشد. بنابراین برای نقطهٔ A می‌توان نوشت:

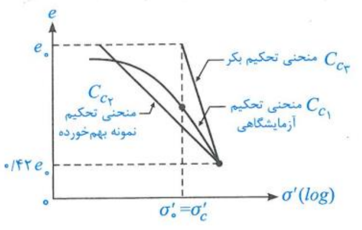
$$U_{z(A)} = ۱ - \frac{\Delta u_{z\,\text{موجود}}}{\Delta u_۰} = ۱ - \frac{۴ \times ۱۰}{۱۰۰} = ۰/۶ \Rightarrow U_{z(A)} = ۶۰\%$$

$\Delta u_۰ \rightarrow q = \Delta p = ۱۰۰ kPa$

تذکر: این سؤال مشابه تست (۳۰) از فصل هفتم کتاب است.

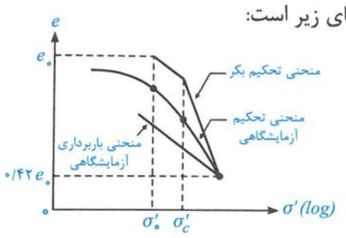
۷- (۴)

هرچه خاک دست‌نخورده‌تر و بِکرتر باشد، شیب منحنی تحکیم آن بزرگ‌تر خواهد بود. به‌عنوان مثال برای یک خاک رس NC با حساسیت کم تا متوسط، نتایج آزمایش‌های تجربی به شرح نمودارهای روبرو به‌دست آمده است:



$$\Rightarrow C_{c_۳} > C_{c_۱} > C_{c_۲}$$

تذکر: برای خاک رس OC باحساسیت کم تا متوسط، نتایج آزمایش‌های تجربی به شرح نمودارهای زیر است:



۸- (۱)

در آزمایش CD نمونه هم تحکیم می‌یابد و هم زهکشی می‌شود، ولی در آزمایش CU نمونه فقط تحکیم می‌یابد و زهکشی نمی‌شود. این در حالی‌است که در آزمایش UU نمونه نه تحکیم می‌یابد و نه زهکشی می‌شود. پس آزمایش CD از همه زمان‌برتر و آزمایش UU از همه سریع‌تر است و می‌توان زمان لازم برای انجام این آزمایش‌ها را به‌صورت زیر مقایسه کرد:

$$CD > CU > UU$$

۹- (۳)

این سؤال مشابه تمرین (۱۸) از متن درس در فصل هشتم کتاب است. بنابراین به طریق مشابه، ابتدا با استفاده از نتایج آزمایش CD بر روی خاک و به‌کارگیری رابطهٔ گسیختگی تنش‌های اصلی، پارامترهای مؤثر مقاومت برشی را می‌یابیم و در ادامه رابطه گسیختگی تنش‌های اصلی را در حالت حاکمیت تنش مؤثر (با به‌کارگیری پارامترهای مؤثر مقاومت برشی) برای آزمایش CU بر روی همین خاک نوشته و مقدار فشار آب حفره‌ای در لحظهٔ گسیختگی را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم:

$$CD \Rightarrow \sigma'_۱ = \sigma'_۳ \tan^۲(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) + ۲c'\tan(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow (۱۰۰+۲۰۰) = (۱۰۰)\tan^۲(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) + ۰ \Rightarrow \tan^۲(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) = ۳$$

ماسه $(c=۰)$

$$CU \Rightarrow (\sigma_۱ - u_f) = (\sigma_۳ - u_f)\tan^۲(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) + ۲c'\tan(۴۵+\frac{\phi'}{۲}) \Rightarrow (۱۵۰+۲۰۰-u_f) = (۱۵۰-u_f)\times ۳ + ۰ \Rightarrow u_f = ۵۰kPa$$

۱۰- (۳)

با توجه به دایره‌ای بودن سطح لغزش، رابطهٔ ضریب اطمینان براساس جمع‌بندی ارائه شده در انتهای صفحهٔ (۲۶۸) کتاب، به‌صورت زیر نوشته می‌شود و در ادامه با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال، مقدار FS محاسبه می‌شود:

$$FS = \frac{\tau_f LR}{Wd} \xrightarrow[\tau_f = c_u]{L = R\theta} FS = \frac{c_u R^۲ \theta}{Wd} = \frac{۶۰ \times ۱۲^۲ \times \frac{\pi}{۲}}{۱۲۰۰ \times ۵} = ۲/۲۶$$

۱۱- (۲)

در بخش $(E\text{-}۲)$ از فصل هفتم کتاب دیدیم که وقتی در یک لایهٔ رسی درجه‌های تحکیم متوسط از ۶۰ درصد کمتر باشند، در آن‌صورت زمان لازم برای رسیدن به یک تحکیم مشخص، با مجذور H_{dr} و U رابطه مستقیم داشته و با C_v نسبت عکس دارد (بالای صفحهٔ ۳۱۶ کتاب را ببینید). بنابراین در این سؤال و برای این دو لایه، نسبت زمان‌های تحکیمی آنها برابر است با:

$$\frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{U_۲}{U_۱})^۲ (\frac{H_{dr_۲}}{H_{dr_۱}})^۲ \frac{C_{v_۱}}{C_{v_۲}}$$

که در ادامه با توجه به اطلاعات داده شده، خواهیم داشت:

$$\frac{t_۲}{t_۱} = (\frac{۴۰}{۳۰})^۲ \left[\frac{۶}{۸ \times \frac{۱}{۲}}\right]^۲ (\frac{۱}{۲}) \Rightarrow t_۲ = ۲۰ \text{ سال}$$

۱۲- (۱)

با توجه به اطلاعات داده شده در صورت سؤال و نیز تعریف C_c و a_v که در قسمت دوم از فصل هفتم کتاب با آنها آشنا شدید، می‌توان نوشت:

$$C_c = ۰/۰۰۹(LL - ۱۰) = ۰/۰۰۹ \times (۴۰ - ۱۰) = ۰/۲۷$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_۰})} \Rightarrow ۰/۲۷ = \frac{\Delta e}{\log(\frac{۱۰۰۰}{۱۰۰})} \Rightarrow \Delta e = ۰/۲۷$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} = \frac{۰/۲۷}{۱۰۰۰ - ۱۰۰} = ۰/۰۰۰۳$$